

刘兵权,黎立云,卫梦希,等. 基于球壳模型的地壳应力与深度关系研究[J]. 矿业科学学报,2022,7(4):474-480. DOI:10.19606/j.j. cnki. jmst. 2022. 04. 009

Liu Bingquan, Li Liyun, Wei Mengxi, et al. A study on relationships between measured crustal stresses and depth based on spherical shell model[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2022, 7(4):474-480. DOI:10.19606/j. cnki. jmst. 2022. 04. 009

## 基于球壳模型的地壳应力与深度关系研究

刘兵权<sup>1</sup>, 黎立云<sup>1,2</sup>, 卫梦希<sup>1,3</sup>, 王博楠<sup>1,4</sup>, 王之东<sup>1,5</sup>

1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083;
2. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083;
3. 北京科技大学土木与资源工程学院,北京 100083;
4. 北京矿冶研究总院,北京 100160;
5. 国电联合动力技术有限公司,北京 100039

**摘要:**随着矿产资源的开发逐步进入地壳深部,对深部地应力场的变化趋势的探究愈发重要。近些年的研究更新了许多地应力数据,有必要基于最新数据对现有估算方法做出改进。本文根据弹性力学基本理论和球壳模型,研究随深度变化的万有引力体积力和内压的作用,得到宏观的应力分布理论公式;引用广泛分布的实测数据,对理论公式中的地壳物理参数进行拟合,得出垂直地应力和平均水平地应力随深度变化的拟合公式。结果表明:在地球的宏观尺度上,地壳应力随深度的分布不再是线性关系,但在当前人类活动范围内,地应力均值随深度基本呈线性变化,与金尼克假说在 $\gamma=22\text{ kN/m}^3$ 、 $\lambda=0.9$ 时的结果最为接近;随着深度增加,平均侧应力系数逐渐趋近于1,比Brown和Hoek提出的包络线更接近实测数据;地壳内部的高压会引起水平拉应力,但自重引起的压应力更高,使得整个地壳内的垂直地应力和水平地应力都为压应力。研究结果可为地壳应力分布趋势的预测特别是深部区域的预测提供参考。

**关键词:**地应力;球壳模型;变体力;内压;物理参数拟合

中图分类号:TD 311

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2022)04-0474-07

## A study on relationships between measured crustal stresses and depth based on spherical shell model

Liu Bingquan<sup>1</sup>, Li Liyun<sup>1,2</sup>, Wei Mengxi<sup>1,3</sup>, Wang Bonan<sup>1,4</sup>, Wang Zhidong<sup>1,5</sup>

1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;
2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, Beijing 100083, China;
3. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
4. Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing 100160, China;
5. Guodian United Power Technology Company Limited, Beijing 100039, China

**Abstract:** Due to the exploitation of mineral resources in the deep underground space, it is more and more important to study the variation trend of deep in-situ stress field. In recent years the researches have updated many in-situ stress data. It is necessary to improve the existing estimation methods on this

收稿日期:2021-07-13 修回日期:2022-03-11

基金项目:国家自然科学基金(52074297);地震动力学国家重点实验室开放基金(LED2019B02)

作者简介:刘兵权(1993—),男,安徽淮南人,博士研究生,主要从事岩石断裂与损伤力学的研究工作。Tel:18810545484, E-mail:liubingquan1993@126.com

通信作者:黎立云(1959—),女,湖南长沙人,教授,博士生导师,主要从事岩石断裂与损伤力学的研究工作。Tel:010-62331261, E-mail:lly@cumt.edu.cn

account. Based on the basic theory of elasticity and spherical shell model, this paper studied the effect of gravitational body force varying with depth and internal pressure, and obtained the theoretical formula of macro in-situ stress distribution; Employing the latest and widely distributed measured data, this paper fitted the crustal physical parameters in the theoretical formula, and obtained the fitting formula of vertical in-situ stress and average horizontal in-situ stress varying with depth. The results show that: the distribution of crustal stresses with depth is no longer linear on the macroscopic scale of the Earth; however, within the current depth range of human activities, basically the average in-situ stresses vary linearly with depth, which is closest to the results of the Dinnick hypothesis at  $\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$  and  $\lambda = 0.9$ ; with the increase of depth, the average lateral pressure coefficient gradually approaches 1, which is closer to the measured data than the envelope proposed by Brown and Hoek; the high pressure in the crust will cause horizontal tensile stress, but the compressive stress generated by gravity is higher and therefore the vertical and horizontal in-situ stress in the whole crust are compressive stress. The research results provide a theoretical prediction model for the estimation of crustal stress distribution trend, especially in deep underground space.

**Key words:** in-situ stress; spherical shell model; varying body force; internal pressure; physical parameter fitting

随着人类生产活动的发展,地壳中各种矿产资源的开发不断深入,煤矿开采深度已超过 1 000 m,金属矿开采深度甚至超过 2 000 m,由深部高地应力引起的岩爆、冲击地压等灾害表现得越来越剧烈<sup>[1]</sup>,因而有必要对深部地应力变化趋势进行理论探讨,为深部工程地应力预测提供参考。

为了获得地应力场的分布数据,现有研究已提出很多高水平的测试方法<sup>[2]</sup>,得到了许多宝贵的地应力实测数据,特别是深部地应力数据。近些年,地应力数据大量更新,有必要建立更完善的理论模型。

关于地应力分布的理论分析,很多学者进行过研究<sup>[3-6]</sup>。金尼克假说认为,垂直地应力为  $\gamma H$ ,水平地应力可通过假定水平应变为 0,由胡克定理求得<sup>[7]</sup>。Brown 等<sup>[8]</sup>基于多个国家和地区的地应力数据(深度多在 1.5 km 以内,最深约为 2.9 km),给出了垂直地应力与深度的线性回归关系(由此得出平均重度为  $27 \text{ kN/m}^3$ )和侧应力系数的包络线。McCutchen<sup>[9]</sup>考虑了岩石自重,利用球壳模型求得了水平地应力和径向地应力与深度的关系,给出了侧应力系数,但没有结合实测数据进行拟合。也有研究利用岩石断裂强度来预测水平地应力的范围<sup>[10]</sup>。这些研究在工程中广泛应用<sup>[11-13]</sup>,但大部分研究未考虑自重体积力随深度变化的情况<sup>[14]</sup>,也没有考虑内压的影响。

影响地应力分布的因素有很多,如地心引力、地壳内部高压、构造运动、地形地貌、岩浆侵入、地温梯度、孔隙水压力、地球自转等<sup>[7]</sup>。地壳深部完整性好于表面,浅层中由于板块运动、地形地貌

的不均匀性对深部地应力的影响将逐渐减弱,应力分布主要由地壳整体的宏观力学条件决定。因此,地应力与深度的函数关系需对起主要作用的岩体自重和地壳内部高压综合分析得出,并通过大量实测数据拟合得到。地温梯度和孔隙水压力引起的地应力变化是一种规律性的静水应力变化,地球自转引起的应力变化也在全球呈现规律性分布<sup>[15]</sup>,因此均可叠加到拟合公式中;岩浆侵入等局部非均匀因素的影响则需根据实地情况考虑。

本文基于前人的研究工作做出以下补充和拓展:对地壳使用球壳模型,同时考虑了随深度变化的万有引力体积力和地球内部高压对地壳应力变化趋势的综合影响,利用大量地应力实测数据对理论公式进行拟合,使之更好地应用于深部工程。

## 1 地壳宏观应力场理论推导

地球可近似视为球体,其半径为 6 371 km。地球的圈层结构由外至内可分为地壳、地幔、地核,其中地壳平均厚度约为 17 km,主要由岩石构成;上地幔主要成分为岩浆,具有一定的流动性<sup>[16]</sup>。在地壳尺度上,可以认为它满足弹性力学基本假设,因此参照弹性力学中球壳应力的解法来求得地壳应力分布。地壳所受荷载为其中各质点所受的万有引力  $f_r$  以及内部的高压力  $p$ <sup>[17]</sup>,如图 1 所示。以地心为原点建立球坐标系,地壳区域总应力场为两部分荷载引起的应力场的叠加。

由弹性力学可知,线弹性条件下受内压的无体力球壳的应力分布为<sup>[18]</sup>

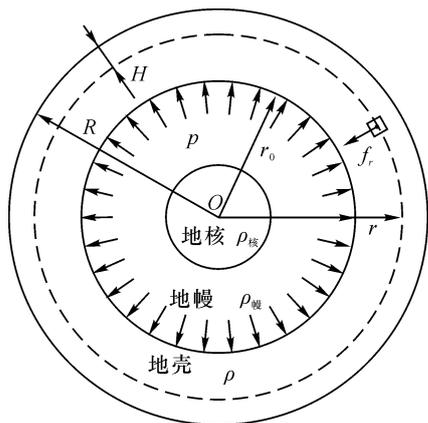


图1 地壳受载模型示意图

Fig. 1 Diagram of crustal loading model

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{pr_0^3}{R^3 - r_0^3} \left(1 - \frac{R^3}{r^3}\right) \\ \sigma_\theta = \frac{pr_0^3}{R^3 - r_0^3} \left(1 + \frac{R^3}{2r^3}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\sigma_r$  为径向应力;  $\sigma_\theta$  为环向应力;  $R$  为地球平均半径;  $r_0$  为地壳与地幔交界处到地心的距离;  $r$  为该地壳单元体到地心的距离。

地壳内部具有极高的内压力  $p$ <sup>[17]</sup>。由式(1)可知,若仅考虑  $p$  的作用,在整个地壳厚度上,环向地应力都为拉应力。这显然与众多地应力实测数据不相符合。

在弹性力学理论中,对含有体力,尤其是考虑万有引力这种与距离有关的变体力情形鲜有讨论,弹性力学书籍中没有现成公式可用,因而需要重新推导。对于球壳,引入自重体积力的作用,可能会使壳体中的各项应力分量都成为压应力。

根据弹性力学,球对称问题的平衡方程<sup>[18]</sup>为

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2}{r}(\sigma_r - \sigma_\theta) + f_r = 0 \quad (2)$$

如图1所示,根据引力的高斯定理,与地心  $O$  相距为  $r$  处的地壳单元体,其所受的万有引力等于半径为  $r$  的球体对它的万有引力<sup>[14]</sup>。鉴于地球的圈层结构,密度在同一圈层内比较接近,在不同圈层之间相差很大,因此将地壳部分的密度视为常数  $\rho$ 。

$$\begin{cases} \sigma_r = (3 - \mu)A_1r^2 + (1 + \mu)A_2 + 2\mu A_3r^{-1} - 2(1 - 2\mu)A_4r^{-3} \\ \sigma_\theta = (1 + 3\mu)A_1r^2 + (1 + \mu)A_2 + A_3r^{-1} + (1 - 2\mu)A_4r^{-3} \end{cases} \quad (8)$$

边界条件为

$$\begin{cases} \sigma_r|_{r=R} = 0 \\ \sigma_r|_{r=r_0} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} (3 - \mu)A_1R^2 + (1 + \mu)A_2 + 2\mu A_3R^{-1} - 2(1 - 2\mu)A_4R^{-3} = 0 \\ (3 - \mu)A_1r_0^2 + (1 + \mu)A_2 + 2\mu A_3r_0^{-1} - 2(1 - 2\mu)A_4r_0^{-3} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

半径为  $r$  的球体的质量  $M$  可以用地球总质量  $M_0$  与该球体以外的地壳质量的差来表示。因此体力可以取为

$$\begin{aligned} f_r &= -\frac{GM\rho}{r^2} = -\frac{G\rho}{r^2} \left[ M_0 - \frac{4}{3}\pi(R^3 - r^3)\rho \right] \\ &= -\left( M_0 - \frac{4}{3}\pi R^3\rho \right) \frac{G\rho}{r^2} + \frac{4}{3}\pi G\rho^2 r \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $G$  为万有引力常数。

从式(3)可看出,体积力  $f_r$  与  $r$  是非线性关系。

由球对称问题的几何方程和物理方程可以得到弹性方程为<sup>[18]</sup>

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{E}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \left[ (1 - \mu) \frac{du}{dr} + 2\mu \frac{u}{r} \right] \\ \sigma_\theta = \frac{E}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \left( \mu \frac{du}{dr} + \frac{u}{r} \right) \end{cases} \quad (4)$$

再将弹性方程式(4)和体力表达式(3)代入平衡方程式(2),可得

$$\begin{aligned} r^2 \frac{d^2u}{dr^2} + 2r \frac{du}{dr} - 2u &= \frac{4\pi G\rho^2(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{3E(1 - \mu)} r + \\ &\frac{G\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{E(1 - \mu)} \left( M_0 - \frac{4}{3}\pi R^3\rho \right) \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)为常微分方程中典型的欧拉方程,其通解为

$$u = \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{E(1 - 2\mu)} (A_1r^3 + A_2r + A_3 + A_4r^{-2}) \quad (6)$$

式中,  $A_1, A_2, A_3, A_4$  为待定系数。

其中,  $A_1, A_3$  可由式(6)代入式(5),  $r$  各幂次的系数对应相等得出

$$\begin{cases} A_1 = \frac{2\pi G\rho^2(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{15E(1 - \mu)} \\ A_3 = -\frac{G\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{2E(1 - \mu)} \left( M_0 - \frac{4}{3}\pi R^3\rho \right) \end{cases} \quad (7)$$

$A_2, A_4$  需通过地壳的边界条件求解。

将式(6)代入弹性方程式(4),可以得到仅由变体力自重引起的应力场:

内压的作用已包含在式(1)中,这里地壳内表面的径向应力应为0。

由式(8)、(9)可得

由此,可解出  $A_2, A_4$ :

$$\begin{cases} A_2 = -\frac{1}{(1+\mu)(R^3-r_0^3)}[(3-\mu)A_1(R^5-r_0^5) + 2\mu A_3(R^2-r_0^2)] \\ A_4 = -\frac{R^3 r_0^3}{(2-4\mu)(R^3-r_0^3)}[(3-\mu)A_1(R^2-r_0^2) + 2\mu A_3(R^{-1}-r_0^{-1})] \end{cases} \quad (11)$$

将仅由变体力自重引起的应力场式(8)与由内压引起的应力场式(1)叠加,即可得到地壳内部

总的应力场表达式:

$$\begin{cases} \sigma_r = (3-\mu)A_1 r^2 + (1+\mu)A_2 + \frac{pr_0^3}{R^3-r_0^3} + 2\mu A_3 r^{-1} - \left[ 2(1-2\mu)A_4 + \frac{pr_0^3 R^3}{R^3-r_0^3} \right] r^{-3} \\ \sigma_\theta = (1+3\mu)A_1 r^2 + (1+\mu)A_2 + \frac{pr_0^3}{R^3-r_0^3} + A_3 r^{-1} + \left[ (1-2\mu)A_4 + \frac{pr_0^3 R^3}{2(R^3-r_0^3)} \right] r^{-3} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中各系数  $A_i$  为与地壳有关的宏观等效物理参数。这些参数很难通过测量得到,但可以通过对现有的地应力实测数据拟合而求得。

可以看出,在地球尺度上,地壳应力分布与深度或半径并不是严格的线性关系;水平地应力与垂直地应力的表达式共用参数  $A_i$ ,因此二者相互关联。

$$\begin{cases} \sigma_r = -s_v \\ \sigma_\theta = -s_a = -\frac{s_H + s_h}{2} \end{cases} \quad (13)$$

将式(12)中的多个常数合并,并结合式(13),得

$$\begin{cases} s_v = B_1 r^2 + B_2 + B_3 r^{-1} - 2B_4 r^{-3} \\ s_a = B_5 r^2 + B_2 + B_6 r^{-1} + B_4 r^{-3} \end{cases} \quad (14)$$

$B_i$  和  $A_i$  的关系可以通过对比式(12)~式(14)得到。

## 2 地壳应力场与深度的关系拟合

上一节基于弹性力学的推导,按弹性力学约定,应力  $\sigma$  以受拉为正。为方便与地应力实测数据进行分析与比较,本文此后将地应力用  $s$  表示。按岩土力学约定,地应力  $s$  以受压为正。

在地应力的工程测量中,通常用  $s_v$  表示垂直主应力,  $s_H$  表示水平方向较大的主应力,  $s_h$  表示水平方向较小的主应力,三者多数情况下为正值,表现为压应力(在弹性理论中应为负值)。由于构造等非均匀性因素的作用,这3个主应力的方向并不严格与铅垂方向和水平方向相同,通常会有一个较小的倾角。本文引用世界地应力图(WSM2016)<sup>[19]</sup>共404条数据的3向主应力都有说明倾角,其中2个水平主应力倾角都不超过10°的数据共288条,占71.3%。本文主要研究均匀性因素的作用,且多数倾角的数值较小,影响不大,在此忽略这个倾角的影响,将  $s_H$  和  $s_h$  取算术平均值  $s_a$ ,作为水平方向地应力值,即

不同地区、不同深度下的地应力测量结果<sup>[19-31]</sup>见图2、图3及附表1(篇幅所限,附表1见于本刊网站)。由于陆地地壳与海洋地壳的天然差异,并且现阶段能搜集到的海洋地应力数据较少,本文只引用陆地地应力数据并对其拟合。由图1可知

$$r = 6\,371 - \frac{H}{1\,000} \quad (15)$$

式中,  $H$  为深度, m。

通过式(15),可将测点到地心的距离  $r$  与深度  $H$  相互转化。

以式(14)作为拟合公式,利用附表1中大量的地应力实测数据,应用最小二乘原理,通过 MATLAB 计算得到参数  $B_i$  的值为

$$B_1 = -0.031\,226, B_2 = 1.083\,0 \times 10^7, B_3 = -8.372\,5 \times 10^{10}, B_4 = -4.628\,0 \times 10^{17}, B_5 = 0.119\,45, B_6 = -2.670\,4 \times 10^{10}.$$

最终得到垂直地应力  $s_v$  和水平向地应力  $s_a$  的数学表达式为

$$\begin{cases} s_v = -0.031\,226 r^2 + 1.083\,0 \times 10^7 - 8.372\,5 \times 10^{10} r^{-1} + 9.255\,9 \times 10^{17} r^{-3} \\ s_a = 0.119\,45 r^2 + 1.083\,0 \times 10^7 - 2.670\,4 \times 10^{10} r^{-1} - 4.628\,0 \times 10^{17} r^{-3} \end{cases} \quad (16)$$

若将式(16)中  $r$  替换为  $H$ ,会增加公式的复杂程度,为工程应用方便,只需得到地应力随测点半径  $r$  变化的表达式即可。

拟合结果表明,垂直地应力  $s_v$  和水平地应力  $s_a$  都随  $r$  的变小而增大,即两者都随深度  $H$  的增大而增大。垂直地应力  $s_v$  拟合曲线的标准偏差为

6.44 MPa,拟合相关系数为0.898 4;水平地应力  $s_a$  的拟合曲线标准偏差为8.19 MPa,拟合相关系数为0.867 3。

## 3 拟合结果对比分析

地应力的拟合结果对比如图2和图3所示。

由水平地应力与垂直地应力的比值可以得出侧应力系数(图4)。

### 3.1 地应力拟合结果分析

图2展示了各文献中垂直地应力实测值  $s_{vm}$ 、本文拟合的  $s_v$  曲线和依据金尼克假说得到的  $s_{vr}$  曲线(重度取  $\gamma=22 \text{ kN/m}^3$ )的对比。可以发现,在5 km 的深度之内( $r>6\ 366 \text{ km}$ ),垂直地应力基本呈线性变化,与金尼克假说非常吻合;而 Brown 和 Hoek 使用线性拟合得到的平均重度为  $\gamma=27 \text{ kN/m}^3$ <sup>[8]</sup>,这可能是拟合时引用的数据差异引起的结果。

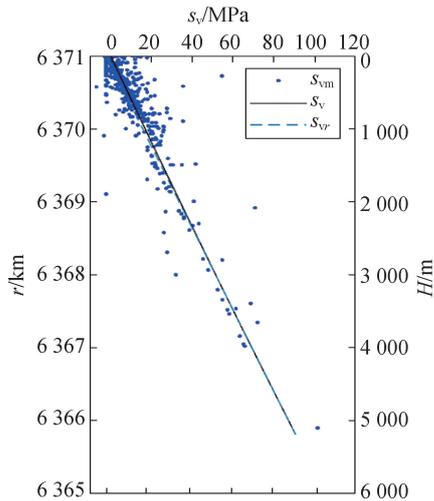


图2 垂直地应力对比

Fig. 2 Comparison of vertical in-situ stress

图3为各文献中水平地应力实测平均值  $s_{am}$ 、本文拟合的  $s_a$  曲线和依据金尼克假说得到的  $s_{ar}$  曲线(重度取  $\gamma=22 \text{ kN/m}^3$ ,侧应力系数取  $\lambda=0.9$ )的对比。可以发现,水平地应力也大致呈线性变化。本文所得平均水平地应力与金尼克假说比较接近,浅部相对差异较大,深部相对差异较小。

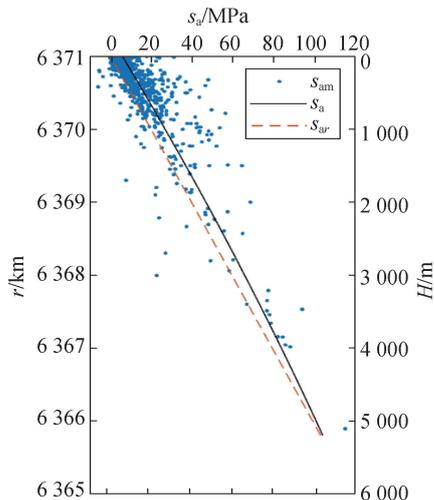


图3 水平地应力对比

Fig. 3 Comparison of horizontal in-situ stress

### 3.2 侧应力系数对比分析

图4为各文献中侧应力系数实测值  $\lambda_m$ 、本文得出的平均侧应力系数  $\lambda$  与 Brown 和 Hoek 给出的侧应力系数的包络线  $\lambda_{max}$ 、 $\lambda_{min}$  的对比。其中,侧应力系数是根据公式  $\lambda=s_v/s_a$  计算得出的。

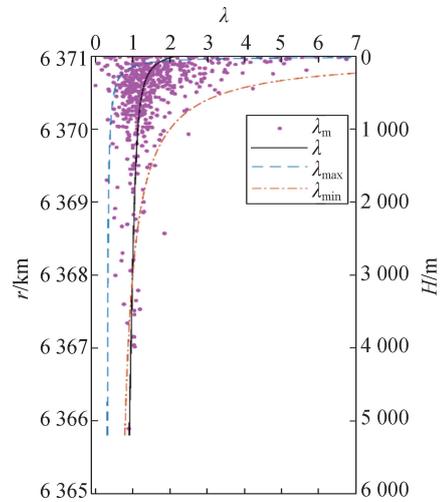


图4 侧应力系数对比

Fig. 4 Comparison of lateral pressure coefficient

由图4可以看出,深度超过约3 km ( $r<6\ 368 \text{ km}$ )时,本文得到的平均侧应力系数已高于 Brown 和 Hoek 给出的侧应力系数上限,更接近于1;实测数据也大多超出此上限,分布在本文得出的  $\lambda$  曲线两侧。这可能是 Brown 和 Hoek 原文缺乏超过3 km 深度的实测数据而导致的。

深度小于70 m ( $r>6\ 370.3 \text{ km}$ )时,本文得到的平均侧应力系数会低于 Brown 和 Hoek 给出的侧应力系数下限,此时自重因素减弱而构造等非均匀性因素显著,水平应力分布离散,平均侧应力系数不具有代表性。深度处于70 m ~ 3 km ( $6\ 368 \text{ km}<r<6\ 370.3 \text{ km}$ )时,平均侧应力系数落在上下限之间,和实际结果比较吻合。

图2~图4中仍有一些较为离散的地应力实测值和侧应力系数值,说明在实际工程中该数据来源区域的构造、温度、孔隙水压力或其他因素比较显著,需要叠加这些因素的影响。

由式(16)可以得到地壳应力分布变化趋势图(图5)。可以看出,在地壳更深处,地应力具有一定的非线性趋势,还需要基于大量深部地应力数据进一步研究。内压会使得球壳内部产生环向拉应力,但通过拟合结果来看,自重等因素的作用使得平均地应力始终为压应力。

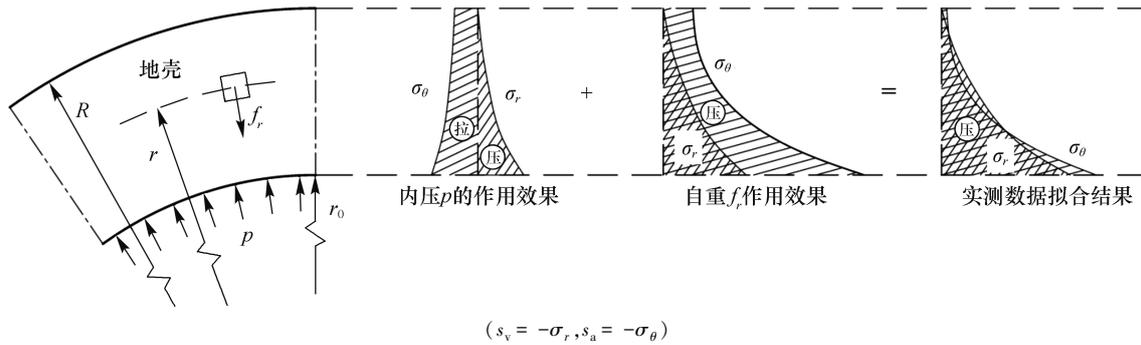


图5 地壳应力变化趋势示意图

Fig. 5 Diagram of crustal stress trends

### 4 结论

(1) 在地球尺度上,地壳应力随深度的分布不再是线性关系,其理论关系符合式(12),水平地应力与垂直地应力相互关联。

(2) 垂直地应力  $s_v$  和水平地应力  $s_a$  都随深度  $H$  的增加而增大,随测点位置变化的拟合关系见式(16)。

(3) 在 5 km 的深度之内,地应力基本随深度线性变化,地应力的大小与金尼克假说在  $\gamma = 22 \text{ kN/m}^3, \lambda = 0.9$  时的结果最为接近,仅浅部的平均水平地应力差异较为明显。

(4) 当深度超过 70 m 时,侧应力系数逐渐趋近于 1,比较符合实际数据;当深度超过 3 km 时,平均侧应力系数比 Brown 和 Hoek 给出包络线更接近实测数据;在近地表区域,侧应力系数分布离散,难以预估。

(5) 地壳内部的高压会引起水平方向产生拉应力,而自重引起的压应力更高,使得整个地壳厚度内的垂直地应力和水平地应力都为压应力。

### 参考文献

[1] 谢和平,高峰,鞠杨,等. 深部开采的定量界定与分析[J]. 煤炭学报,2015,40(1):1-10.  
Xie Heping, Gao Feng, Ju Yang, et al. Quantitative definition and investigation of deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 1-10.

[2] (德)阿尔诺·赞格, (德)奥韦·斯特凡松. 田家勇, 王成虎, 等, 译. 地壳应力场[M]. 北京:地震出版社, 2013:115-204.

[3] Anderson E M. The dynamics of faulting and dyke formation with application to Britain [M]. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1951.

[4] Célérier B. Seeking Anderson's faulting in seismicity: a centennial celebration [J]. Reviews of Geophysics,

2008, 46(4):RG4001.

[5] Biot M A. General theory of three-dimensional consolidation [J]. Journal of Applied Physics, 1941, 12(2): 155-164.

[6] Rice J R, Cleary M P. Some basic stress diffusion solutions for fluid-saturated elastic porous media with compressible constituents [J]. Reviews of Geophysics, 1976, 14(2): 227-241.

[7] 刘允芳. 岩体地应力与工程建设[M]. 武汉:湖北科学技术出版社, 2000.

[8] Brown E T, Hoek E. Trends in relationships between measured in-situ stresses and depth [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1978, 15(4): 211-215.

[9] McCutchen W R. Some elements of a theory for In-situ stress [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1982, 19(4): 201-203.

[10] 朱哲明, 胡荣, 李业学. 利用岩石断裂强度来估算地下岩体水平应力的范围 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1721-1728.  
Zhu Zheming, Hu Rong, Li Yexue. Evaluation of range of horizontal stresses of underground rock mass by using rock fracture strength [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1721-1728.

[11] Brady B H G, Brown E T. Rock mechanics for underground mining [M]. New York: Kluwer Academic Publishers, 2005.

[12] Hoek E, Brown E T. Underground excavations in rock [M]. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980.

[13] 高峰. 地应力分布规律及其对巷道围岩稳定性影响研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.

[14] 陈国云, 骆成洪, 辛勇, 等. 高斯定理与环路定理在万有引力场中的推广 [J]. 南昌大学学报: 工科版, 2008, 30(4): 354-358.  
Chen Guoyun, Luo Chenghong, Xin Yong, et al. Extension of Gauss's law and circuital law in the universal gravitation field [J]. Journal of Nanchang University: Engineering & Technology, 2008, 30(4): 354-358.

- [15] 王连捷,张利容,王薇,等. 地球自转速率变化引起的全球应力场[J]. 地质力学学报,1997(3):14-22.  
Wang Lianjie, Zhang Lirong, Wang Wei, et al. Global stress field caused by the change of rate of the earth's rotation[J]. Journal of Geomechanics, 1997(3):14-22.
- [16] 王家映. 地球物理学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1988.
- [17] 金祖孟. 地球概论[M]. 3版. 修订本. 北京:高等教育出版社,1997.
- [18] 徐芝纶. 弹性力学-上册[M]. 4版. 北京:高等教育出版社,2006.
- [19] Heidbach O, Rajabi M, Cui Xiaofeng, et al. The world stress map database release 2016; crustal stress pattern across scales[J]. Tectonophysics, 2018, (744), 484-498.
- [20] 陈彭年,陈宏德,高莉青. 世界地应力实测资料汇编[M]. 北京:地震出版社,1990.
- [21] 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 Chaowen, Li Haibo, Liu Yaqun. 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.
- [22] 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[J]. 地球物理学报,2014,57(7):2165-2180.  
Qin Xianghui, Zhang Peng, Feng Chengjun, et al. In-situ stress measurements and slip stability of major faults in Beijing region, China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(7):2165-2180.
- [23] 康红普,姜铁明,张晓,等. 晋城矿区地应力场研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(1):1-8.  
Kang Hongpu, Jiang Tieming, Zhang Xiao, et al. Research on in situ stress field in Jincheng mining area and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1):1-8.
- [24] 赵德安,陈志敏,蔡小林,等. 中国地应力场分布规律统计分析[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(6):1265-1271.  
Zhao Dean, Chen Zhimin, Cai Xiaolin, et al. Analysis of distribution rule of geostress in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6):1265-1271.
- [25] 李勇,汤达祯,孟尚志,等. 鄂尔多斯盆地东缘煤储层地应力状态及其对煤层气勘探开发的影响[J]. 矿业科学学报,2017,2(5):416-424.  
Li Yong, Tang Dazhen, Meng Shangzhi, et al. The in situ stress of coal reservoirs in east margin of Ordos Basin and its influence on coalbed methane development [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2017, 2(5):416-424.
- [26] 周宏伟,谢和平,左建平. 深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J]. 力学进展,2005,35(1):91-99.  
Zhou Hongwei, Xie Heping, Zuo Jianping. Developments in researches on mechanical behaviors of rocks under the condition of high ground pressure in the depths [J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(1):91-99.
- [27] 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[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(S1):2875-2880.  
Li Xinping, Wang Bin, Zhou Guilong. Research on distribution rule of geostress in deep stratum in Chinese mainland[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1):2875-2880.
- [28] 丰成君,陈群策,谭成轩,等. 广东核电站地应力测量及其应用[J]. 岩土力学,2013,34(6):1745-1752.  
Feng Chengjun, Chen Qunce, Tan Chengxuan, et al. In-situ stress measurement and its application to Guangdong nuclear power stations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6):1745-1752.
- [29] 刘泉声,刘恺德. 淮南矿区深部地应力场特征研究[J]. 岩土力学,2012,33(7):2089-2096.  
Liu Quansheng, Liu Kaide. Characteristics of in situ stress field for deep levels in Huainan coal mine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(7):2089-2096.
- [30] 陈群策,丰成君,孟文,等. 5.12汶川地震后龙门山断裂带东北段现今地应力测量结果分析[J]. 地球物理学报,2012,55(12):3923-3932.  
Chen Qunce, Feng Chengjun, Meng Wen, et al. Analysis of in situ stress measurements at the northeastern section of the Longmenshan fault zone after the 5.12 Wenchuan earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(12):3923-3932.
- [31] 蔡美峰,冀东,郭奇峰. 基于地应力现场实测与开采扰动能量积聚理论的岩爆预测研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(10):1973-1980.  
Cai Meifeng, Ji Dong, Guo Qifeng. Study of rockburst prediction based on in situ stress measurement and theory of energy accumulation caused by mining disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(10):1973-1980.

(责任编辑:陈骏)