

引用格式: 闫绍坤, 王成虎, 高桂云, 等, 2024. 基于钻孔岩芯饼化现象的地应力估算方法探究及应用[J]. 地质力学学报, 30(6): 865–877. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2023196](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2023196)

Citation: YAN S K, WANG C H, GAO G Y, et al., 2024. Exploration and application of in-situ stress estimation method based on core diskling phenomenon of boreholes[J]. Journal of Geomechanics, 30(6): 865–877. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2023196](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2023196)

基于钻孔岩芯饼化现象的地应力估算方法探究及应用

闫绍坤^{1,2}, 王成虎¹, 高桂云¹, 刘冀昆^{1,2}, 代向前^{1,2}

YAN Shaokun^{1,2}, WANG Chenghu¹, GAO Guiyun¹, LIU Jikun^{1,2}, DAI Xiangqian^{1,2}

1. 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085;

2. 中国地质大学(北京), 北京 100083

1. *National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management, Beijing 100085, China;*

2. *China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China*

Exploration and application of in-situ stress estimation method based on core diskling phenomenon of boreholes

Abstract: [Objective] Rock core diskling is a typical phenomenon that occurs in environments with high in-situ stress. The geometric characteristics and section shape of rock diskling are related to the state of in-situ stress, and the site where this phenomenon occurs may be unsuitable for measuring in-situ stress. To obtain more comprehensive in-situ stress data from a wider range of sources, according to this phenomenon, in-situ stress estimation is conducted based on the internal relationship between the in-situ measurement data and the original in-situ stress, and the obtained result can supplement the in-situ stress measurement data. [Methods] According to the relevant hypotheses and theories worldwide, the change in core section stress and core internal energy during the core diskling phenomenon was analyzed. The physical and geometric characteristics of the disked rock cores were measured, combined with the stress state of the original rock, and an in-situ stress estimation formula based on core diskling characteristics was constructed. The results were compared with those of the other formulas. [Results] The geometric characteristics of 73 representative rock disks in the 30–120 m depth section of the Dalianshan borehole in Dandong, Liaoning Province, where the phenomenon of rock core diskling occurs, are measured, and the physical properties of the core are tested. The value of the in-situ stress in this section is estimated using the established in-situ stress estimation formula to supplement and perfect the measured hydraulic fracturing data and better reveal the law of in-situ stress variation. [Conclusion] This section is estimated according to other in-situ stress estimation formulas based on the phenomenon of core diskling proposed by scholars worldwide; the calculated results either deviate from reality or are dispersed in the distribution. Compared with these formulas, the in-situ stress data estimated by this formula are more in line with reality and meet the stress conditions for the generation of core diskling. [Significance] The results show that the results obtained using this method can complement and perfect the in-situ stress data of the core diskling depth section.

Keywords: core diskling; high geostress; long and short axis of the core; geostress estimation

摘要: 岩芯饼化是在高地应力环境下产生的典型现象之一, 其形成的岩饼的几何特征、断面形态与原地应力状态具有相关性, 并且产生该现象的部位可能不适宜直接进行原地应力测量。为获得更全面、来源更广泛的地应力数据, 依据该现象, 基于饼化岩芯现场测量数据与原地应力之间的内在关系, 进行地

基金项目: 国家自然科学基金项目(42174118)

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42174118).

第一作者: 闫绍坤(2000—), 男, 在读硕士, 主要研究方向为地应力测量等方面。Email: 1131975034@qq.com

通讯作者: 王成虎(1978—), 男, 研究员, 主要从事地应力与地质力学、断层力学等研究工作。Email: huchengwang@163.com

收稿日期: 2023-12-25; 修回日期: 2024-04-01; 录用日期: 2024-04-23; 网络出版日期: 2024-06-24; 责任编辑: 吴芳

应力估算, 所得结果对地应力测量数据具有补充完善的作用。依据岩芯饼化国内外研究相关假设和理论, 分析岩芯饼化现象发生过程中出现的岩芯断面应力和岩芯内部能量变化情况, 测量饼化岩芯的物理性质、几何特征, 结合其原岩应力状态, 构建基于岩芯饼化特征的地应力估算公式, 并与其他公式作对比。对辽宁丹东大连山钻孔内出现岩芯饼化的 30~120 m 深度段 73 块代表性岩饼的几何特征进行测量, 对该段岩芯物理性质进行试验, 运用所构建的地应力估算公式估算该段地应力大小, 补充完善水压致裂测量数据。同时依据国内外学者曾提出的基于岩芯饼化现象的其他地应力估算公式对该段进行估算, 计算结果或偏离实际, 或分布离散, 相较之下以此公式估算补充后的地应力数据更符合实际, 并满足产生岩芯饼化的应力条件。研究结果表明, 该地应力估算方法所得结果可以补充完善钻孔饼状深度段地应力数据。

关键词: 岩芯饼化; 高地应力; 岩芯长短轴; 地应力估算

中图分类号: TD311; P553 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616(2024)06-0865-13

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023196

0 引言

深部及高应力条件下钻孔取芯的过程常出现岩芯饼化现象, 中国的二滩水电站、拉西瓦水电站、锦屏 II 级水电站等, 以及国外瑞典 Forsmark 核电站等均出现了这种破坏形式(姜谟男等, 2010)。传统的地应力测量方法如水压致裂法受限条件很多(钟山等, 2018; 李鹏等, 2023), 岩芯饼化部位的地应力通常难以直接测量, 而岩芯饼化与其所处的地应力环境相关联(侯发亮, 1985), 通过二者之间建立相互关系, 可以估算地应力大小, 对深部及高应力条件工程地应力测量结果具有补充完善作用。

国内外对岩芯饼化现象早有研究。1958 年已有岩芯饼化现象出现的报导(Hast, 1967); 之后, Jaeger and Cook(1963)试验发现岩芯断裂多从中间开始, 新产生的破坏面上也没有剪切破坏的痕迹, 因此认为是张拉破坏的结果; Obert and Stephenson(1965)通过模拟实验发现径向围压超过岩石抗压强度的一半时发生岩芯饼化, 因此推测岩芯饼化由剪切作用引起; 李树森等(2004)基于弹性理论, 以卸荷的观点研究了岩芯的拉断特征; 张宏伟等(2014)从能量变化的角度上验证了拉伸作用引起岩芯饼化破坏的正确性; 马天辉等(2016)通过数值模拟发现径向应力是引起岩芯饼化的主要因素。目前对岩芯饼化现象的破坏机制的研究较为全面。

随着研究的深入, 学者们将岩芯饼化现象应用于原地应力的估算工作中。Matsuki et al.(2004)通过对岩芯饼化的主拉应力分析, 以数值方法确定原岩应力; Haimson and Lee(1995)和 Lim and Martin

(2010)分别通过花岗岩的现场试验观测, 得到了由岩芯破坏模式推测地应力的方法; 侯发亮和贾愚如(1984)结合光弹、电测试验和电算结果, 以剪切破坏的角度推导出地应力估算公式, 但张旭和郭奇峰(2017)使用侯发亮和贾愚如(1984)提出的公式进行地应力估算时结果并不理想, 厚岩饼周围地应力值的估算偏差较大; 李彦恒等(2012)通过岩饼几何形态的测量提出了估算地应力的公式。但是这些估算公式部分考虑的因素不全面, 部分考虑的因素测量工作较难开展(李彦恒等, 2012; 汪文桥等, 2018; Li et al., 2019), 计算结果受到各因素的影响导致误差较大, 从而较难采用。为在工程中便于估算地应力、补充地应力数据, 充分考虑岩芯的饼化特征、物理参数和应力状态, 构建便于测量、结果可靠的地应力估算公式, 文章通过对丹东市大连山 DYLL2 钻孔内饼化深度段地应力大小进行估算, 补充完善水压致裂法地应力测量的数据, 判定岩芯饼化发生所需的地应力大小, 并与其他估算公式进行偏差对比分析, 为岩芯饼化现象研究和地应力测量数据完善提供参考。

1 地应力大小估算公式

1.1 岩芯饼化机制

岩芯饼化现象与岩爆现象的产生有着相似性。张宏伟等(2014)认为在岩体上钻取岩芯破坏了其在三向应力下的平衡状态, 岩体应力重新分布, 应力状态由三向转变为单向, 转变过程中伴随能量的跃迁, 与兰天伟等(2012)所提出的岩爆发生的应力与能量的转化机理相似, 岩爆和岩芯饼化的产生

都需要一定的能量条件;唐绍辉等(2003)提出巷道开挖后洞周岩体近似处于单轴受压的脆性破坏状态,产生张性破裂进而发生岩爆,现场调查发现岩爆部位在平行洞壁的方向上受到切向的单轴压力,产生与壁面平行的张性破裂面,进而岩片折断或者边缘局部剪断;而张丰收等(2022)建立的三维离散-连续混合模型从力学角度分析岩芯饼化的裂缝发展行为,发现随着钻孔取芯的进行,饼化段岩芯的根部在应力重分布作用下产生大量裂缝。两种现象的破坏过程很相似。钻取岩芯时,在临断裂前,可以认为岩芯自上而下以截面为单位不完全地释放能量,内部的残余能量越向下,积累的越多,在根部断面上的能量达到峰值造成断裂。

岩芯饼化存在多种破坏形式。侯发亮和贾愚如(1984)对饼面基本水平的规则椭圆形薄岩饼的研究将岩芯饼化破坏形式归结于剪切破坏,然而这是基于其选择的岩饼做出的片面判断;李占海等(2011)对锦屏深部饼化岩芯断口进行电镜扫描,断口形貌显示岩芯饼化先由周边发生压剪破坏,在解除孔壁应力后,由拉应力作用向内部演化最终拉伸断裂成饼,这是不同于剪切破坏的过程。不同学者关于岩饼破坏特征和形式的认识不同,拉破坏形式可以作为岩芯饼化现象分析的基础。

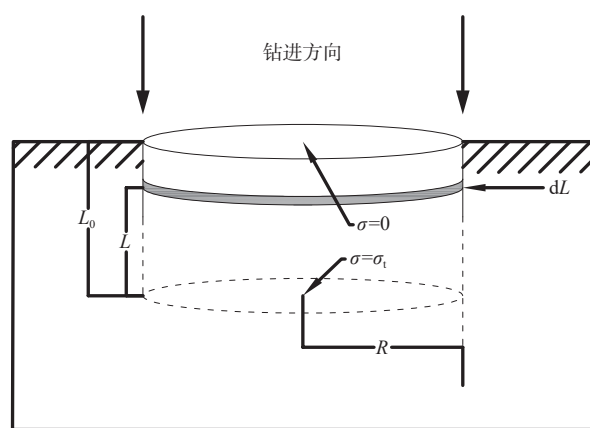
以岩芯饼化为拉破坏形式为基础,认为在取芯过程中,岩芯以径向横截面为单位从上到下依次地释放贮存的弹性变性能,但在完全断裂之前,岩芯受到下部岩芯的约束,不能完全地将其释放。随着岩芯卸荷厚度的增加,累积未释放的弹性变形能越来越多。与此同时根部处于径向压力的单轴压缩状态,外缘应力集中现象越来越明显,最终在根部产生微小的压裂缝和剪裂缝。此时岩芯内部累积了足够的弹性变形能,在根部的细小裂缝处应力集中达到了岩芯的抗拉强度,裂缝发育贯通成面,岩芯断裂。忽略钻头扰动以及断裂产生的热量,岩芯断裂前后具有的弹性变形能相等。在断裂后,饼化岩芯中的剩余弹性变形能完全释放,全部转化为岩芯在径向上发生弹性形变所做的功,并且这一变形造成饼化岩芯出现长、短轴特征。

1.2 断裂前弹性变形能累积

假设孔内岩芯原本受到径向2个互相垂直的主应力以及轴向的应力,自钻孔取芯之后发生岩芯饼化,岩饼的长轴方向为最大径向主应力方向,短轴方向为最小径向主应力方向。

随着钻取的进行,岩芯以垂直钻孔轴线的截面为单位产生均匀形变来释放能量,但受到深处下层岩体的约束,形变未能完全释放岩芯内部的能量,且越靠近下部岩体,岩芯截面未释放的能量越多。岩芯顶部截面能量完全释放,在顶部产生的应力为0;底部截面累积能量达到最大,即底部应力达到抗拉强度 σ_t 。

假设从岩芯顶部到底部,产生的应力大小线性增加,取岩芯内部厚度为 dL 的柱状单元体(图1阴影处)。



L_0 —岩饼厚度, mm; dL —单元体厚度, mm; L —单元体距底截面长度, mm; σ —截面应力, MPa; σ_t —岩石抗拉强度, MPa; R —岩饼半径, mm

图1 断裂前饼化的岩芯示意图

Fig. 1 Schematic of disk core before fracture

单元体中的平均应力为:

$$\sigma = \sigma_t - \frac{\sigma_t \cdot L}{L_0} \quad (1)$$

其中 σ 为岩芯柱状单元体的平均应力,即岩芯截面应力, MPa; R 为岩饼的平均半径, mm; L 为单元体到岩芯根部断裂面的距离, mm; L_0 为岩饼断裂前的厚度, mm; σ_t 为岩石的抗拉强度。

则该单元体内的平均比能为:

$$u = \frac{\sigma^2}{2E} = \frac{\sigma_t^2 (L_0 - L)^2}{2EL_0^2} \quad (2)$$

其中, u 为单元体内平均比能, MPa; E 为岩芯岩石的弹性模量, MPa。该单元体中贮存的弹性变形能为:

$$dU = u \cdot dV = \frac{\sigma_t^2 (L_0 - L)^2}{2EL_0^2} \cdot \pi R^2 \cdot dL \quad (3)$$

其中, dU 为单元体内的弹性变形能, 10^{-3} J; dV 为单元体体积, mm^3 ; dL 为单元体厚度, mm; πR^2 为岩饼面积, mm^2 。

则整个饼化岩芯断裂前贮存的弹性变形能为:

$$U = \frac{\pi R^2 \sigma_t^2 L_0}{6E} \quad (4)$$

其中 U 为整块岩饼在断裂前贮存的弹性变形能, 10^{-3} J。

而由于岩芯断裂之前已经在根部由压应力产生裂缝, 根据张宏伟等(2014)提出的岩芯饼化能量判据, 岩芯发生饼化至少需要的能量为:

$$U_0 = \frac{\sigma_c^2}{2E} \cdot \pi R^2 L_0 \quad (5)$$

其中 U_0 为岩芯满足发生饼化现象条件时岩饼在断裂前具有的最小能量要求, 10^{-3} J; σ_c 为岩石单轴抗压强度, MPa。

这也是饼化段岩芯在原地应力条件下径向差应力在岩芯内部所积蓄的能量。

1.3 断裂后形变释放能量

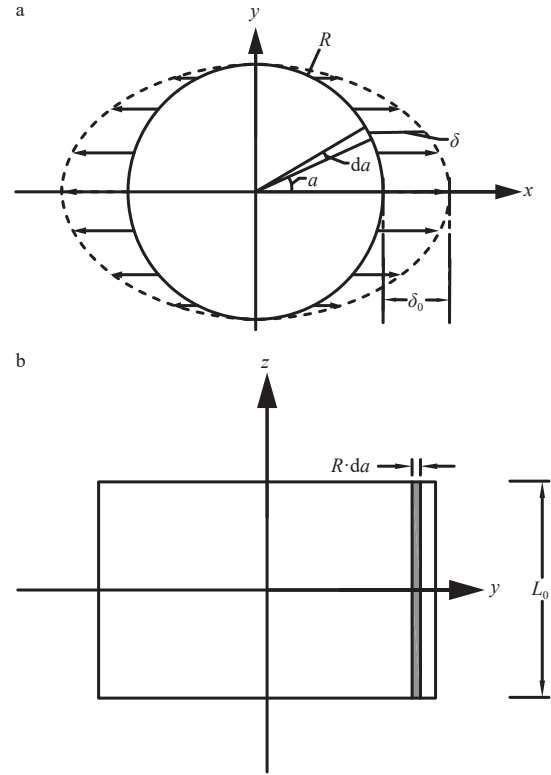
在岩芯断裂后, 由于此前已经发生均匀形变, 剩余能量则全部转化为岩芯因形变在长轴上而做的功。由于对称性, 取 1/4 岩芯为研究对象(图 2)。

在岩饼外缘面取一单元面, 单元面长度即为岩饼厚度 L_0 , 竖向两侧边与岩芯中心轴连线夹角对应的弧度为 da (rad), 宽为 $R \cdot da$, 单元面面积 dA (mm²) 为 $L_0 \cdot R \cdot da$ 。在发生形变前长轴方向应力大小为 $\Delta\sigma$, 单元面此时在长轴方向上发生形变做功的位移为 δ , 随 y 轴线性变化。而长轴线上岩饼形变前后的总位移变化记为 $2\delta_0$, $\delta_0 = D/2(1+\mu)$, mm; 其中 D 为岩芯长短轴之差, mm; μ 为岩芯的岩石泊松比。则单元面对外做功产生的位移 δ (mm) 为 $\delta_0 \cdot (1 - \sin a)$ 。

假设形变过程中在长轴方向上单元面的应力线性衰减至 0, 衰减前后应力值差为 $\Delta\sigma$ (MPa), 且主应力方向与 xyz 坐标轴平行。则单元面形变前后沿 x 轴方向所做的功为:

$$\begin{aligned} dt &= dp \cdot \delta = \frac{\Delta\sigma}{2} \cdot dA \cdot \delta_0 (1 - \sin a) \\ &= \frac{D \cdot L_0 \cdot R \cdot \Delta\sigma}{4(1+\mu)} (1 - \sin a) da \end{aligned} \quad (6)$$

其中, dt 为单元面向外扩张 $d\delta$ 所做的功, 10^{-3} J; dp 为单元面在 x 轴方向形变时受力, N; δ 为单元面形变前后沿 x 轴位移, mm; $\Delta\sigma$ 为单元面形变前后在 x 轴方向上的应力差, MPa; dA 为单元面面积, mm²; δ_0 为长轴形变前后沿 x 轴位移, mm; a 为单元面一竖向侧边与岩芯中心轴的连线和 x 轴夹角对应的弧度, rad; D 为岩饼长短轴之差, mm; da 为单元面竖向两侧边与岩芯中心轴连线夹角对应的弧度, rad; μ 为岩石泊松比。



R —岩饼半径, mm; da —单元面弧度, rad; a —单元面至 x 轴弧度, rad; δ —单元面沿 x 轴形变前后位移, mm; δ_0 —单元面沿 x 轴形变前后最大位移, mm; L_0 —岩饼厚度, mm

a—断裂后岩饼横截面示意图; b—断裂后岩饼侧面示意图

图 2 断裂后饼化的岩芯示意图

Fig. 2 Schematic of disked core after fracture

(a) Cross-sectional diagram of rock disks after fracture; (b) Lateral view of rock disks after fracture

1/4 岩芯形变做功 t (10^{-3} J) 为:

$$t = \frac{D \cdot L_0 \cdot R \cdot \Delta\sigma}{4(1+\mu)} \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) \quad (7)$$

因而积分后得到整块岩芯形变总功 T (10^{-3} J) 为:

$$T = \frac{D \cdot L_0 \cdot R \cdot \Delta\sigma}{1+\mu} \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) \quad (8)$$

其中, T 为岩饼断裂后形变总功, 10^{-3} J。

1.4 径向主应力

岩芯破裂前剩余弹性变形能与破裂后形变做功相等, 公式(4)与公式(8)相等, 得到:

$$\Delta\sigma = \frac{\pi R \sigma_t^2 (1+\mu)}{3DE(\pi-2)} \quad (9)$$

其中, $\Delta\sigma$ 为单元面形变前后在 x 轴方向上的应力差, MPa。

由于断裂前已经发生均匀形变, 剩余能量则全部转化为岩芯因形变在长轴上而做的功, 因此岩芯断裂后的岩饼在短轴方向上的应力值为 0, 在长轴

方向的应力值为 $\Delta\sigma$, 也即径向最大、最小抗力之差。

而岩芯在达到破坏条件所具有的能量来自于径向差应力, 断裂后的能量释放也通过径向差应力做功的方式。近似认为饼化后的岩芯几何形状与未受地应力时岩芯一致, 也即 2 个时期岩芯长短轴长度一致, 未开采时在长轴方向上受到径向差应力压缩变形成钻取时的规则圆柱状。则岩芯断裂后形成的径向差应力与取芯前岩芯受到的径向差应力之比等于断裂后具有的能量与该岩饼在取芯前具有的能量之比, 即:

$$\frac{\sigma_x - \sigma_y}{\Delta\sigma} = \frac{U_0}{U} \quad (10)$$

其中 σ_x 为岩芯径向最大主应力, MPa; σ_y 为岩芯径向最小主应力, MPa。

因而得到岩芯径向原地应力差:

$$\sigma_x - \sigma_y = 3 \cdot \Delta\sigma \cdot \frac{\sigma_c^2}{\sigma_t^2} \quad (11)$$

其中 $\Delta\sigma$ 为单元面形变前后的应力差, 在这里代表了岩芯径向最大最小应力差, MPa; σ_c 为岩石单轴抗压强度, MPa; σ_t 为岩石抗拉强度, MPa

1.5 主应力

Matsuki et al. (2004) 和 Bungler et al. (2010) 提出了由拉伸断裂引起的岩芯饼化现象的破坏准则, 当岩芯断裂根部抗力恰好达到抗拉强度 σ_t 时, 3 个主应力满足以下条件:

$$k_x \left(\frac{L_s}{R} \right) \sigma_x + k_y \left(\frac{L_s}{R} \right) \sigma_y + k_z \left(\frac{L_s}{R} \right) \sigma_z = \sigma_t \quad (12)$$

其中, $k_x(L_s/R)$ 、 $k_y(L_s/R)$ 和 $k_z(L_s/R)$ 是与 L_s/R 有关的常数; R 为该段岩芯断裂后形成的岩饼的半径, mm; L_s 为岩饼的计算厚度, mm; σ_x 为岩芯径向最大主应力, MPa; σ_y 为岩芯径向最小主应力, MPa; σ_z 为岩芯轴向主应力, MPa; σ_t 为岩石抗拉强度, MPa。具体的数值根据以下拟合后的关系曲线(图3)确定。

L_s/R 的取值通过岩饼的厚度 L_0 估算:

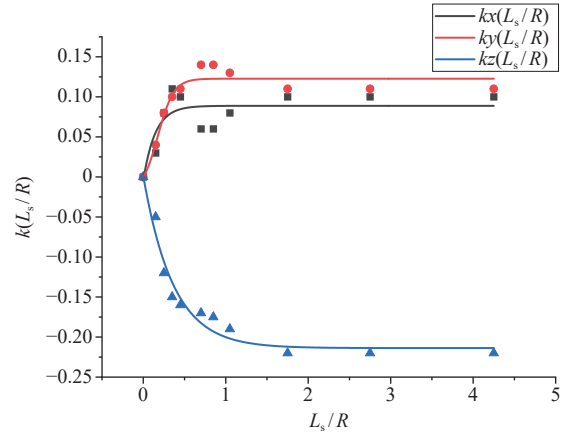
$$\frac{L_s}{R} = \frac{L_0/R}{1 + 0.00261(L_0/R)^{-4.37}} - 0.0716 \quad (13)$$

其中, L_0 为岩饼的测量厚度, mm。

将公式(11)代入公式(12), 当 3 个主应力已知其一, 即可得到另外 2 个。若 σ_z 已知, 可得 σ_x 、 σ_y 。

$$\sigma_y = \left[\sigma_t - k_z \left(\frac{L_s}{R} \right) \sigma_z - k_x \left(\frac{L_s}{R} \right) \left(3 \cdot \Delta\sigma \cdot \frac{\sigma_c^2}{\sigma_t^2} \right) \right] / \left[k_y \left(\frac{L_s}{R} \right) + k_x \left(\frac{L_s}{R} \right) \right] \quad (14)$$

$$\sigma_x = \sigma_y + 3 \cdot \Delta\sigma \cdot \frac{\sigma_c^2}{\sigma_t^2}$$



$k_x(L_s/R)$ 、 $k_y(L_s/R)$ 、 $k_z(L_s/R)$ —与 L_s/R 有关的常数; R —岩芯断裂后形成的岩饼的平均半径, mm; L_s —岩饼的计算厚度, mm

图3 系数 k_x 、 k_y 、 k_z 与 L_s/R 的关系 (Kaga et al., 2003)

Fig. 3 The relationship between the k_x 、 k_y 、 k_z coefficients and L_s/R

那么, 对于垂直孔饼化的岩芯, 钻取前所处境位受到的最大水平主应力值 $S_H = \sigma_x$, MPa; 最小水平主应力值 $S_h = \sigma_y$, MPa; 垂直主应力值 $S_v = \sigma_z = \gamma H$, MPa。

1.6 其他基于岩芯饼化现象的地应力估算公式

为方便工程使用, 选取 6 个涉及到的计算参数易于现场获得的其他地应力估算公式, 进行估算结果合理性的比较。

侯发亮和贾愚如 (1984):

$$S_H = 0.644E \frac{D}{2R} \quad (15)$$

$$S_H = 3.19 \sqrt{\frac{E\tau_0 D}{(1+\mu)L\lambda}}$$

$$\text{其中, } \lambda = \left(2 - \frac{L}{l} \right)^2 \left[\left(2 - \frac{L}{l} \right)^2 + 2 \left(2 - \frac{L}{l} \right) + 4 \right] \quad (16)$$

其中, $l = 0.35 \cdot 2R$, 为岩芯中心轴上地应力搏击高度, mm; τ_0 为岩石抗剪强度, MPa; E 为岩石弹性模量, MPa; D 为岩芯长短轴之差, mm; L 为饼化岩芯厚度, mm; R 为岩饼半径, mm。

侯发亮和贾愚如 (1984):

$$S_H = E \frac{D}{2R(1+\mu)} \quad (17)$$

$$S_H = 0.785\tau_0 \frac{2R}{L} \quad (18)$$

其中, μ 为岩石泊松比。

Lim and Martin (2010):

$$S_H = A + \frac{B}{e^{\frac{C}{L}}} \quad (19)$$

其中, A 、 B 、 C 为拟合参数, 对于花岗岩, $A=63.70$,

$B=75.11$, $C=3.20$ 。

刘世煌(1988)提及的石金良公式为:

$$S_H = ED \sqrt{\frac{R_1^2 + R_2^2}{8R_1^2 R_2^2}} \quad (20)$$

其中, R_1 为长轴半径, mm; R_2 为短轴半径, mm。

2 岩芯饼化地应力大小估算实例分析

DYL2 钻孔位于丹东市东港市黑沟村大连山风景区的山坡上, 钻孔终孔深度 500.95 m, 钻孔孔径为 75 mm, 钻孔水位约 5.2 m, 钻遇岩性主要为花岗岩, 在孔深 30~112 m 的范围出现不同程度的岩芯饼化现象。

2.1 岩芯饼化特征

根据岩芯端口的破坏特征以及侧面形态将饼化岩芯分为以下 4 类(图 4)。

(1) 破裂状岩饼: 收集完整能够拼凑成特征明显的岩饼, 由于岩饼较薄或开挖扰动过于剧烈, 在岩饼内部结构薄弱处发生断裂致使岩饼裂开。105 m 深处破裂状岩饼见图 4a。

(2) 薄饼状岩饼: 厚度小于 10 mm 的岩饼, 凹凸面十分明显, 部分呈碗状, 边缘较薄, 断面呈圆状或椭圆状, 且取芯过程受到扰动影响比较大, 断面表面较为光滑。108 m 深处薄饼状岩饼见图 4b。

(3) 厚饼状岩饼: 厚度在 10~40 mm 范围内的岩饼, 凹凸面或马鞍形断面明显具有轴线, 断面呈圆状或椭圆状, 较为常见, 易观察到沟坎。95 m 处厚饼状岩饼见图 4c。

(4) 短柱状岩饼: 厚度在 40 mm 以上, 能观察到凹凸面或马鞍形断面, 断面呈圆状或椭圆状, 断面较粗糙。39m 深处短柱状岩饼见图 4d。

钻孔在 30~112 m 的深度范围内进行钻孔扫描后, 结合岩芯断裂情况统计结构面密度见图 5。

30~112 m 深度范围内并无破碎带发育, 结构面密度小于 2 条/m, 可以划分为岩芯完整带, 岩体较为完整, 结构面清晰可见且分布密度较低。饼化岩芯从外部观察也并未发现裂隙和结构面。因此 DYL2 钻孔 30~112 m 深度段内发生的岩芯饼化现象并不是由于节理裂隙引起。

现场取样测得饼化岩芯相邻段的岩石弹性模量为 49.86 GPa, 抗拉强度为 4.79 MPa, 抗压强度为 117.94 MPa, 剪切强度为 23.59 MPa。



图 4 饼化的岩芯分类

Fig. 4 Classification of disking core

(a) Fractured rock disks; (b) Pancake rock disks; (c) Thick rock discs; (d) Short cylindrical rock disks

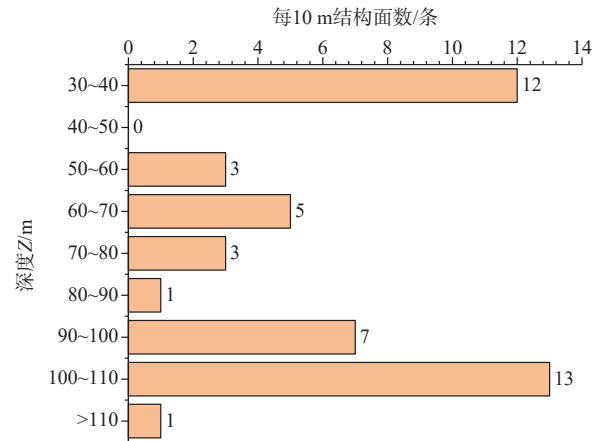


图 5 30~112 m 深度结构面密度分布

Fig. 5 Density distribution of structural plane at depths of 30~112 m

2.2 地应力大小估算分析

依据文中提出的基于岩芯饼化现象的地应力估算公式(9), 具有明显的长短轴特征的岩饼能够进行较好的地应力大小的估算。因此形态特征为薄饼、厚饼和短柱状的岩饼可以使用。随机均匀选取其中 73 个具有代表性的岩饼进行测量并对地应力估算。

基于文中构建的估算公式(14),得到的两水平主应力和垂直主应力的深度分布见图6。

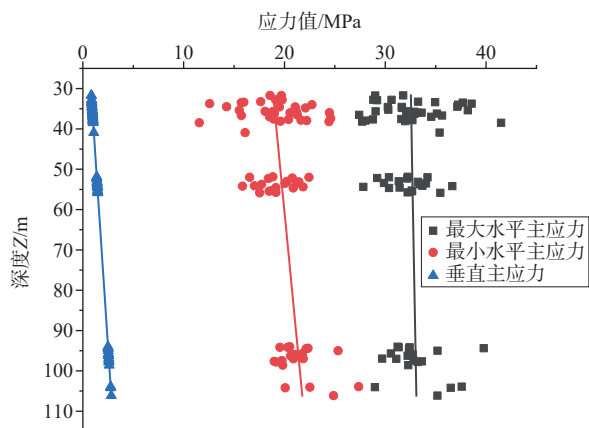


图6 岩芯饼化估算地应力的深度分布

Fig. 6 Depth distribution of the lateral pressure coefficient of rock core disk to estimate ground stress

在发生岩芯饼化的深度段内,深度越浅三向主应力越小;而垂直主应力减小幅度更大,越浅水平应力作用更强,逆冲断层应力状态越明显(张丰收等, 2022),所以在浅部岩芯饼化现象更强,岩饼数据更多。估算的样本数据的分布较为合理,虽然在浅部较为离散,但总体集中稳定,三向主应力随深度的分布均可视为线性分布。

3 水压致裂数据拟合分析

DYL2 钻孔地应力测量采用水压致裂法测得 174.77~486.69 m 之间 11 段数据,结合附近另一个钻孔 10 段实测数据,共有 21 段实测数据,参照 Shoeney 公式(Shoeney, 1994)对应力数据进行拟合,结果如图7所示。

由图7可以看出,仅依据水压致裂地应力测量数据对其进行侧压力系数拟合计算的结果误差会很大,并且在水压致裂测量深度范围内,深度越浅,实测侧压力系数分布越分散。

将上述地应力估算结果对水压致裂实测数据进行补充,按照 Shoeney 公式(Shoeney, 1994)对应力数据进行拟合,结果如图8所示。

通过岩芯饼化现象地应力估算数据对地应力测量数据进行补充完善,浅部地应力数据明显更加集中,拟合曲线与数据的散点分布吻合较好,解决了水压致裂测量数据在未曾测量的饼化部位深度的误差过大问题。

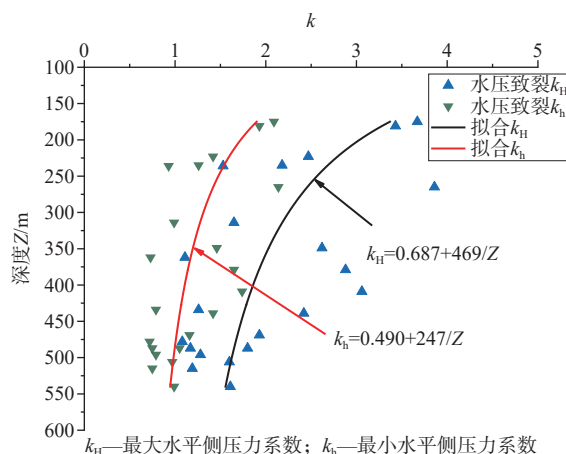


图7 水压致裂实测数据的侧压力系数的深度分布拟合图

Fig. 7 The fitted plot of lateral pressure coefficient based on the hydraulic fracturing measurements

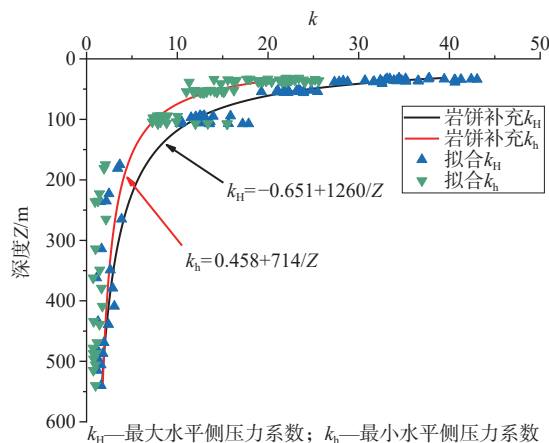


图8 岩饼估算数据补充后侧压力系数的深度分布拟合图

Fig. 8 Fitting diagram of the lateral pressure coefficient with depth distribution after supplementing the estimated rock disks data

使用文中构建的以及其他基于岩芯饼化现象的地应力估算公式对选取的 73 块岩饼所处深度地应力值进行计算,结果如表1所示。

4 产生岩芯饼化的地应力条件判定

根据《工程岩体分级标准》(GBT 50218—2014)(中华人民共和国住房和城乡建设部, 2015),岩体产生饼化现象的应力条件为 $\sigma_c / \sigma_{\max} < 7$, $\sigma_{\max}$ 为径向最大主应力也即 DYL2 钻孔中岩芯所受 S_H , σ_c 为岩石单轴抗压强度,即 117.94 MPa。

因此,在岩芯饼化发生的深度段,需要满足应力条件 $S_H > 16.85$ MPa。仅由水压致裂测量数据拟

表 1 岩芯饼化部位的地应力计算结果

Table 1 The calculation results of in-situ stress at the disk part of the core

深度 Z/m	水压致裂拟合 S_H /MPa	岩饼补充后拟合 S_H /MPa	公式(14) S_H /MPa	公式(15) S_H /MPa	公式(16) S_H /MPa	公式(17) S_H /MPa	公式(18) S_H /MPa	公式(19) S_H /MPa	公式(20) S_H /MPa
31.70	13.03	32.91	31.79	1054.15	409.79	1448.56	62.60	64.28	823.33
31.72	13.03	32.90	29.01	1495.12	442.80	2054.53	51.53	63.88	1163.50
32.76	13.05	32.89	28.82	1540.37	438.56	2116.70	49.07	63.83	1192.44
32.80	13.05	32.89	30.63	1211.15	428.65	1664.30	59.62	64.10	937.07
32.90	13.05	32.88	29.19	1443.93	429.23	1984.18	50.14	63.89	1119.08
33.25	13.06	32.88	33.26	892.16	379.38	1225.96	63.40	64.36	692.43
33.38	13.06	32.88	34.95	733.96	332.19	1008.58	59.08	64.18	569.44
33.49	13.06	32.87	37.70	633.59	339.78	870.65	71.61	64.90	491.81
33.75	13.07	32.87	38.57	535.90	210.94	736.41	32.63	63.70	415.80
33.98	13.07	32.87	37.23	960.59	468.42	1320.00	89.76	66.60	745.46
34.50	13.08	32.86	37.16	608.38	297.90	836.01	57.32	64.11	472.35
34.56	13.08	32.86	31.64	1317.56	500.90	1810.54	74.83	65.14	1024.97
34.58	13.08	32.86	30.25	1296.11	444.84	1781.05	60.00	64.22	1005.93
34.80	13.09	32.85	31.66	1454.37	538.22	1998.53	78.27	65.52	1124.63
35.25	13.09	32.84	30.30	1511.62	521.20	2077.20	70.62	64.85	1176.00
35.40	13.10	32.84	38.20	614.29	335.81	844.13	72.14	64.83	477.19
35.64	13.10	32.84	29.05	1767.79	544.38	2429.22	65.88	64.45	1381.94
35.66	13.10	32.84	32.08	995.06	385.01	1367.37	58.54	64.20	773.88
35.75	13.10	32.84	32.88	990.63	416.12	1361.28	68.69	64.73	770.07
35.97	13.11	32.83	33.61	1522.30	581.62	2091.88	87.32	66.22	1191.08
36.00	13.11	32.83	33.21	1100.87	464.70	1512.77	77.08	65.29	850.53
36.20	13.11	32.83	35.12	864.08	410.80	1187.38	76.75	65.23	672.20
36.26	13.11	32.83	32.90	1194.61	488.32	1641.58	78.44	65.37	927.21
36.51	13.12	32.82	27.42	2263.97	566.45	3111.04	55.69	63.91	1760.34
36.69	13.12	32.82	35.64	699.43	328.22	961.12	60.52	64.20	543.19
37.00	13.13	32.81	34.56	868.65	402.20	1193.66	73.18	64.99	673.25
37.38	13.13	32.81	32.20	1829.44	630.02	2513.94	85.26	65.94	1421.90
37.56	13.14	32.80	31.60	1099.20	418.71	1510.47	62.68	64.41	850.62
37.67	13.14	32.80	28.78	1664.84	490.57	2287.75	56.80	64.07	1287.07
37.83	13.14	32.80	32.70	1260.00	503.36	1731.44	79.02	65.43	973.29
37.94	13.14	32.80	28.04	2387.20	639.06	3280.38	67.23	64.76	1864.79
38.10	13.15	32.79	31.98	1126.10	444.44	1547.44	68.93	64.64	877.84
38.20	13.15	32.79	27.72	4224.51	902.12	5805.13	75.70	65.02	3317.23
38.48	13.15	32.79	41.49	465.35	268.22	639.47	60.75	64.24	361.02
40.91	13.20	32.75	35.39	722.06	334.55	992.22	60.91	64.31	561.11
51.88	13.40	32.56	32.25	1039.87	403.65	1428.94	61.57	64.36	806.02
52.00	13.40	32.55	30.37	1755.21	575.27	2411.92	74.09	65.11	1368.51
52.01	13.40	32.55	34.19	789.44	258.08	1084.81	33.15	63.71	613.27
52.19	13.40	32.55	29.20	1656.02	496.81	2275.63	58.57	64.16	1289.69

续表 1

深度 Z/m	水压致裂拟合 S_{H1} /MPa	岩饼补充后拟合 S_{H1} /MPa	公式(14) S_{H1} /MPa	公式(15) S_{H1} /MPa	公式(16) S_{H1} /MPa	公式(17) S_{H1} /MPa	公式(18) S_{H1} /MPa	公式(19) S_{H1} /MPa	公式(20) S_{H1} /MPa
52.31	13.41	32.55	32.18	1011.93	378.20	1390.54	55.55	64.12	787.74
53.00	13.42	32.54	31.34	1256.51	462.34	1726.64	66.85	64.64	976.86
53.12	13.42	32.53	33.24	1179.90	484.12	1621.37	78.06	65.57	916.47
53.40	13.43	32.53	29.88	1604.51	518.90	2204.85	65.94	64.50	1248.51
53.53	13.43	32.53	34.04	995.87	437.16	1368.48	75.41	65.36	772.91
53.75	13.43	32.52	33.42	887.99	361.57	1220.24	57.85	64.21	690.75
54.12	13.44	32.52	33.69	836.18	255.12	1149.04	30.59	63.70	650.49
54.20	13.44	32.52	36.66	669.06	326.47	919.39	62.60	64.44	519.88
54.38	13.44	32.51	27.83	2329.67	588.65	3201.33	58.45	64.19	1787.77
54.54	13.45	32.51	31.42	1135.41	406.43	1560.23	57.17	64.16	884.39
54.66	13.45	32.51	30.38	1465.35	495.76	2013.62	65.91	64.53	1134.94
55.28	13.46	32.50	32.63	1003.98	398.25	1379.62	62.08	64.38	778.12
55.46	13.46	32.49	32.66	982.61	386.19	1350.26	59.65	64.31	761.33
55.75	13.47	32.49	32.22	1065.42	412.79	1464.06	62.85	64.39	823.14
55.85	13.47	32.49	35.46	777.43	367.53	1068.30	68.28	64.83	603.52
94.00	14.17	31.83	31.23	1301.90	329.94	1789.02	32.86	63.70	1010.08
94.15	14.17	31.83	32.42	1082.10	353.82	1486.98	45.46	63.78	839.78
94.16	14.17	31.83	31.33	1266.19	379.58	1739.95	44.72	63.76	982.10
94.40	14.17	31.82	39.77	799.21	425.77	1098.23	89.13	66.44	624.44
94.50	14.18	31.82	32.36	1365.59	503.84	1876.54	73.05	64.88	1064.01
95.00	14.18	31.81	35.19	1410.82	560.60	1938.69	87.53	66.24	1091.55
95.68	14.20	31.80	30.57	1586.34	503.09	2179.87	62.70	64.34	1232.78
95.95	14.20	31.79	32.74	1188.72	455.32	1633.49	68.53	64.60	924.87
96.26	14.21	31.79	32.22	1199.67	437.90	1648.53	62.81	64.34	933.76
96.96	14.22	31.78	29.69	1779.75	499.14	2445.65	55.01	63.99	1389.64
97.02	14.22	31.78	31.10	1364.84	440.10	1875.50	55.77	64.02	1066.67
97.44	14.23	31.77	32.81	1066.39	393.50	1465.38	57.06	64.08	826.49
97.66	14.23	31.77	33.64	950.98	272.36	1306.80	30.65	63.70	740.48
97.80	14.24	31.76	33.23	991.27	356.39	1362.16	50.35	63.87	772.75
98.59	14.25	31.75	32.29	1117.73	364.13	1535.93	46.62	63.81	867.20
103.92	14.35	31.66	37.59	1362.49	569.17	1872.28	93.43	67.01	1064.33
104.05	14.35	31.65	28.98	2159.25	533.80	2967.14	51.86	63.96	1693.93
104.20	14.35	31.65	36.50	848.30	404.83	1165.69	75.92	65.32	659.03
106.14	14.39	31.62	35.17	1352.02	543.63	1857.88	85.90	66.23	1048.09

合计算得出的地应力值并未达到导致岩芯饼化的应力条件。

据中国大陆地壳应力环境基础数据库(谢富仁 和崔效锋, 2015), 结合实测情况, 钻孔周边区域断层构造以走滑为主, 存在逆断层; 孔内水压致裂实

测数据显示水平构造作用强烈; 地温测量结果显示地温梯度较低; 钻孔位于山谷中的半山坡, 靠近谷底的深度范围存在应力集中现象。因此推测认为 DYL2 钻孔 30~112 m 深度的范围内的岩层主要受到高水平构造应力环境和山谷地貌诱发的应力集

中现象的影响,产生局部的高应力环境,导致该深度范围岩体处于水平主应力极高的逆冲断层应力状态,因此在取芯之后发生岩芯饼化现象。随着深度的增加,应力状态逐渐变为静水压力状态(张丰收等, 2022)。

进行水压致裂测量深度均为并未发生岩芯饼化部位,并在饼化深度更深的部位,对这些实测地应力数据进行拟合,计算得到的饼化段的应力数据更偏向于静水压力状态,水平应力会比实际小很多,误差很大。

岩芯饼化深度范围地应力估算数据补充之后,拟合曲线无论在水压致裂测量数据部分还是在岩芯饼化估算数据部分都具有很好的吻合性,相较于地应力估算数据补充之前,拟合结果更加可靠,岩芯饼化深度范围处于逆冲断层应力状态,并且满足应力条件 $S_H > 16.85 \text{ MPa}$ 。

5 基于岩芯饼化的地应力估算误差分析

上述所用各个地应力估算公式(14)–(20)的计算结果均满足产生饼化现象的应力条件,但彼此差距很大。因此取 N 为偏差系数,表征同一深度各式计算结果与水压致裂数据拟合计算结果的比值,结果如图9所示。

公式(14)计算结果的偏差系数 $B=2.02\sim 3.15$,公式(15)的偏差系数 $N=35.38\sim 321.29$;公式(16)的偏差系数 $N=16.14\sim 68.61$,公式(17)的偏差系数 $N=48.61\sim 441.50$,公式(18)的偏差系数 $N=2.15\sim 6.87$,公式(19)的偏差系数 $N=4.46\sim 5.10$,公式(20)的偏差系数 $N=27.45\sim 252.29$ 。其中,公式(15)–(17)和(20)的偏差系数都很高并且波动极大,误差极高;公式(18)–(19)和(14)的偏差系数小,波动小。

侯发亮和贾愚如(1984)提出了与岩石剪切强度无关和有关的2个公式。与岩石剪切强度无关的公式计算结果的偏差系数很大,分布也很离散,即公式(15),仅考虑了岩石弹性模量和岩饼长短轴特征相关。在同种岩石条件下,计算结果与长短轴差值关联度非常高,需要精度非常高的测量结果,但在很多情况下并不能获取高精度的测量结果,导致计算的结果偏差大,波动也很大。与岩石剪切强度有关的公式计算结果的偏差系数仍然很大,分布很离散,即公式(16),考虑了岩石的弹性模量、长短轴特征、岩饼厚度和剪切强度,没有考虑岩芯破坏时

拉伸破坏的情况,并且式中长短轴差值的变化范围很小,而岩饼厚度的变动范围很大,导致计算结果受岩饼厚度影响、偏差和波动都很大。

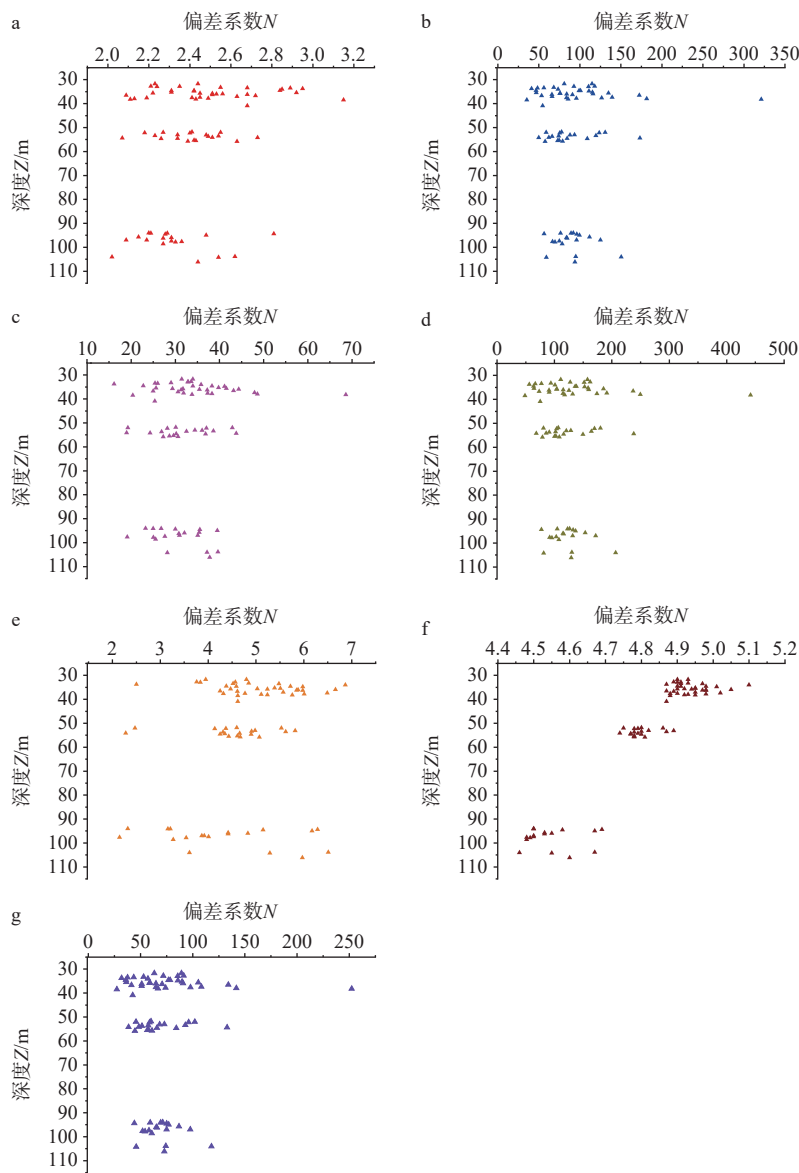
侯发亮和贾愚如(1984)给出了考虑与不考虑岩饼长短轴特征的2个公式。考虑该特征的公式计算结果偏差系数很大,分布很离散,即公式(17),考虑了岩石弹性模量、泊松比、长短轴特征以及岩饼的直径,但是并没有考虑到岩芯的破坏形式和岩饼的厚度,同一尺寸孔径下取出的岩饼直径变化不大,因而结果与公式(15)相似,受长短轴差值的影响很大,对其测量精度要求高,所以计算结果偏差和波动都很大。不考虑岩饼长短轴特征的公式计算结果偏差系数有所减小,但是分布很离散,即公式(18),考虑了岩石的剪切强度、直径和厚度,忽视了岩饼长短轴的特征,在岩芯直径变化很小的情况下,受到岩饼厚度的影响较大,计算结果偏差波动较大。

Lim and Martin(2010)提出的以大量统计数据为基础的估算公式计算结果偏差系数较小,分布较集中,即公式(19),系数选取建立在大量统计的基础上,考虑了岩饼厚度,限制了结果对岩饼厚度的敏感度,使得偏差系数的波动小,但是对于发生部位、破坏形式、长短轴特征等因素不加考虑,导致与实际的偏差较大。

刘世煌(1988)曾提及石金良提出的应变能角度的估算公式计算结果偏差系数很大,分布也很离散,即公式(20),充分考虑了岩饼长短轴的特征,而没有考虑破坏形式和岩饼厚度,计算结果对长短轴差值的敏感度、偏差和波动都很大。

以上6个公式(15)–(20)都没有考虑到岩芯饼化部位原地应力状态。张丰收等(2022)对不同应力状态下的岩体进行了取芯模拟,发现垂向应力也严重影响岩芯饼化现象的产生和破坏过程,在较浅处的饼化岩芯,没有考虑到应力状态的估算公式计算结果误差很大。

文中提出的基于岩芯饼化的地应力值估算公式(14)结合应力状态,考虑岩芯破坏形式和成饼后的形态,计算结果偏差和波动都很小,最为合理,并且没有高精度测量的要求。但该式的使用建立在岩芯饼化是拉伸破坏的基础上,对于剪切破坏特征较为明显的岩饼,估算结果误差可能很大,并且构建地应力估算公式时三向主应力与抗拉强度的关系准则中的系数也由统计得出,岩芯饼化的破坏形



a—公式(14)计算结果的偏差系数分布; b—公式(15)计算结果的偏差系数分布; c—公式(16)计算结果的偏差系数分布; d—公式(17)计算结果的偏差系数分布; e—公式(18)计算结果的偏差系数分布; f—公式(19)计算结果的偏差系数分布; g—公式(20)计算结果的偏差系数分布

图 9 各估算公式计算结果的偏差系数分布

Fig. 9 Distribution of deviation coefficients of the results calculated by each estimation formula

(a) Formula (14); (b) Formula (15); (c) Formula (16); (d) Formula (17); (e) Formula (18); (f) Formula (19); (g) Formula (20) calculates the distribution of the deviation coefficients of the results

式与三主应力的关系需要进一步研究。

6 结论

考虑岩芯饼化破坏方式、岩饼的几何特征和物理性质以及应力状态, 构建地应力估算公式, 对丹东市 DYL2 钻孔出现岩芯饼化的 30~112 m 深度段的地应力进行估算, 对水压致裂法实测数据进行补充完善, 并与其他地应力估算公式进行对比分析,

主要结论如下。

(1) DYL2 钻孔的薄饼、厚饼和短柱状岩饼有明显的长短轴特征, 适于地应力估算, 选取的 73 块岩饼的地应力估算结果满足产生岩芯饼化的应力条件。

(2) 岩芯饼化地应力估算数据补充完善了水压致裂地应力测量数据, 按照 Shoerey 公式对地应力数据进行拟合, 地应力随深度拟合结果较补充前更合理, 并符合实际情况。

(3)其他基于岩芯饼化的地应力估算公式存在考虑因素少、测量精度要求高、单一因素敏感度高等问题,估算结果波动很大且偏离实际,不能有效使用,而文中所构建的地应力估算公式考虑因素全面、测量精度要求易于满足,补充完善后的地应力数据更好地揭示了地应力变化规律,便于使用。

References

- BUNGER A P, 2010. Stochastic analysis of core discing for estimation of in situ stress[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43(3): 275-286.
- HAIMSON B C, LEE M Y, 1995. Estimating *in situ* stress from borehole breakouts and core discing—experimental results in granite [C]//Proceedings of the international workshop on rock stress measurement at great depth. Tokyo: ISRM: 19-24.
- HAST N, 1967. The state of stresses in the upper part of the earth's crust[J]. *Engineering Geology*, 2(1): 5-17.
- HOU F L, JIA Y R, 1984. Stress analysis on disced rock cores[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 6(5): 48-58. (in Chinese with English abstract)
- HOU F L, 1985. Critical under-ground stress of disked rock cores and the relation between the thickness of rock disk and under-ground stress[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*(1): 37-48. (in Chinese with English abstract)
- JAEGER J C, COOK N G W, 1963. Pinching off and discing of rocks[J]. *Journal of Geophysical Research*, 68(6): 1759-1765.
- JIANG A N, CENG Z W, TANG C A, 2010. Three-dimensional numerical test of element safety degree of rock core discing and feed-back analysis of geostresses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 29(8): 1610-1617. (in Chinese with English abstract)
- KAGA N, MATSUKI K, SAKAGUCHI K, 2003. The in situ stress states associated with core discing estimated by analysis of principal tensile stress[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(5): 653-665.
- LAN T W, ZHANG H W, HAN J, et al., 2012. Study on rock burst mechanism based on geo-stress and energy principle[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 29(6): 840-844, 875. (in Chinese with English abstract)
- LI J, FAN P X, WANG M Y, 2019. The stress conditions of rock core discing based on an energy analysis[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52(2): 465-470.
- LI S S, NIE D X, REN G M, 2004. The fracture mechanism of discal drill core and its influence on characteristic of engineering geology[J]. *Advance in Earth Science*, 19(S1): 376-379. (in Chinese with English abstract)
- LI Y H, TAN K K, FENG L, 2012. Estimation of in situ geostress states from measuring shape of disked core[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 33(S2): 224-228. (in Chinese with English abstract)
- LI Z H, LI S J, FENG X T, et al., 2011. Characteristics and formation mechanism of core discing in deep rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 30(11): 2254-2266. (in Chinese with English abstract)
- LIM S S, MARTIN C D, 2010. Core discing and its relationship with stress magnitude for Lac du Bonnet granite[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(2): 254-264.
- LIU S H, 1988. Core discing phenomenon of Laxiwa hydropower Station[J]. *Xibei Shuidian*(3): 11-18. (in Chinese with English abstract)
- MA T H, WANG L, XU T, et al., 2016. Mechanism and stress analysis of rock core discing[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 37(10): 1491-1495. (in Chinese with English abstract)
- MATSUKI K, KAGA N, YOKOYAMA T, et al., 2004. Determination of three dimensional in situ stress from core discing based on analysis of principal tensile stress[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(7): 1167-1190.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2015. Standard for engineering classification of rock mass: GB/T 50218-2014[S]. Beijing: China Planning Press. (in Chinese)
- OBERT L, STEPHENSON D E, 1965. Stress conditions under which core discing occurs[J]. *Society of Mining Engineers*, 232(3): 227-235.
- SHEOREY P R, 1994. A theory for *in situ* stresses in isotropic and transverse isotropic rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 31(1): 23-34.
- TANG S H, WU Z J, CHEN X H, 2003. Approach to occurrence and mechanism of rockburst in deep underground mines[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 22(8): 1250-1254. (in Chinese with English abstract)
- WANG W Q, HU Q G, NING G Z, 2018. Estimation of the in-situ stress in rock mass in the tunnel of N-J hydropower station excavated with TBM[J]. *Soil Engineering and Foundation*, 32(4): 428-432. (in Chinese with English abstract)
- XIE F R, CUI X F, 2015. Crustal stress field map of China and its neighboring regions [M]. Beijing: SinoMaps Press.
- ZHANG F S, LI M L, ZHANG C Y, et al., 2022. Study on fracture propagation and formation mechanism of core discing at depth under high in-situ stresses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 41(03): 533-542. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H W, RONG H, HAN J, et al., 2014. Study on rock core discing mechanism based on stress and energy principle[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 31(4): 512-517. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG X, GUO Q F, 2017. Characteristics of core discing and calculation of in-situ rock stress in deep rock mass[J]. *Metal Mine*(10): 163-170. (in Chinese with English abstract)
- ZHONG S, JIANG Q, FENG X T, et al., 2018. A case of in-situ stress measurement in Chinese Jinping underground laboratory[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 39(1): 356-366. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 侯发亮, 贾愚如, 1984. 岩芯饼化的应力分析[J]. *岩土工程学报*, 6(5): 48-58.
- 侯发亮, 1985. 岩芯饼化的临界地应力及岩饼厚度与地应力的关系[J]. *武汉水利电力学院学报*(1): 37-48.
- 姜谟男, 曾正文, 唐春安, 2010. 岩芯成饼单元安全度三维数值试验

- 及地应力反馈分析[J].岩石力学与工程学报,29(8):1610-1617.
- 兰天伟,张宏伟,韩军,等,2012.基于应力及能量条件的岩爆发生机理研究[J].采矿与安全工程学报,29(6):840-844,875.
- 李树森,聂德新,任光明,2004.岩芯饼裂机制及其对工程地质特性影响的分析[J].地球科学进展,19(S1):376-379.
- 李彦恒,谭可可,冯利,2012.基于岩饼几何形态测量的原地应力测定方法[J].岩土力学,33(S2):224-228.
- 李占海,李邵军,冯夏庭,等,2011.深部岩体岩芯饼化特征分析与形成机制研究[J].岩石力学与工程学报,30(11):2254-2266.
- 刘世煌,1988.拉西瓦水电站的岩芯饼化现象[J].西北水电技术(3):11-18.
- 马天辉,王龙,徐涛,等,2016.岩芯饼化机制及应力分析[J].东北大学学报(自然科学版),37(10):1491-1495.
- 唐绍辉,吴壮军,陈向华,2003.地下深井矿山岩爆发生规律及形成机理研究[J].岩石力学与工程学报,22(8):1250-1254.
- 汪文桥,胡泉光,宁光忠,2018.巴基斯坦N-J水电站引水隧洞地应力估算[J].土工基础,32(4):428-432.
- 谢富仁,崔效锋,2015.中国及邻区现代地壳应力场图[M].北京:中国地图出版社.
- 张丰收,李猛利,张重远,等,2022.高地应力下深部岩芯饼化裂缝发展规律及机制研究[J].岩石力学与工程学报,41(3):533-542.
- 张宏伟,荣海,韩军,等,2014.基于应力及能量条件的岩芯饼化机理研究[J].应用力学学报,31(4):512-517.
- 张旭,郭奇峰,2017.深部岩体岩芯饼化特征分析与原岩应力计算研究[J].金属矿山(10):163-170.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部,2015.工程岩体分级标准:GB/T 50218-2014[S].北京:中国计划出版社.
- 钟山,江权,冯夏庭,等,2018.锦屏深部地下实验室初始地应力测量实践[J].岩土力学,39(1):356-366.