

钻孔偏心—套芯法地应力测量中的一个不可忽视的问题

邵兆刚¹, 孟宪刚¹, 冯向阳², 王 津¹, 丁原辰¹

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 中国地质博物馆, 北京 100031)

[摘 要]通过有限元法计算, 得出偏心钻孔在围压作用下的应力分布, 讨论了由于“偏心”导致率定的换算公式失准, 表明小孔孔壁应变和位移随“偏心”增大而显著改变。利用保角变换以实例对压磁法偏心钻孔的地应力测量数据进行了修正, 对比同一钻孔相近深度上基本不偏心的测量结果, 表明修正后二者相当吻合。

[关键词]应力解除 钻孔偏心 地应力 率定 有限元计算

[中图分类号] TU459 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2003)05-0091-04

套芯法地应力测量又称应力解除法, 这是一种常用的现场地应力测量方法。该方法要求套芯钻孔与测量孔(小孔)应有严格的同轴度(郭守忠, 1985)。然而在实际工作中, 套芯钻孔与测量孔往往存在不同轴度(即“偏心”)的问题。而涉及套芯钻孔偏心的误差问题至今未见深入研究, 实际工作中往往忽略了钻孔“偏心”而产生的误差。虽然钻孔偏心对应力解除过程不会产生影响(蔡美峰等, 1995, Pank, L A, 1966,), 但却会对后期进行的率定产生严重偏差。

套芯法地应力测量中通常采用围压率定法(丁原辰执笔, 1979)。即利用围压率定机对传感器进行标定, 该方法利用测点处所取的岩芯, 其岩石力学性质与原地岩石相近; 另外, 传感器在岩芯测孔中的安装状态保持不变; 岩芯承受的是均匀围压, 这与推导公式时所作的假定是一致的。

围压率定的换算公式是以同心圆孔受围压的应力状态导出的, 即圆孔内是均匀的应力分布。

由厚壁筒公式可推导出下式:

$$E = \frac{2\sigma_a}{1 - \left(\frac{a^2}{b^2}\right)} \quad (1)$$

式中: a —岩芯内孔半径; b —岩芯外半径; s —

岩芯外加均匀围压(单位为: kg/cm^2)

当岩石试件与岩芯的力学性质完全相同, 若对岩石试件所施加的单向均匀外加压应力 σ' 取值为:

$$\sigma' = \frac{2}{3\left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right)} \sigma \quad (2)$$

那么在压应力 σ' 方向上产生的小孔径向位移与岩芯施加均匀围压 σ 时相同。因此, 用率定机对传感器进行率定时, 通过式(1)、(2)可求得相应的单向均匀外加应力的率定结果。

如果钻孔出现“偏心”, 岩芯在率定时, 其内部的应力、应变分布状态和同心圆孔相比均发生了明显的变化, 下面将通过有限元和解析法计算讨论误差的大小。

1 利用有限元法计算“偏心”钻孔截面应力分布

选取内外圆半径分别为 $r_1 = 19 \text{ mm}$, $r_0 = 63 \text{ mm}$, 利用有限元法分别对“偏心”和“同心”圆孔施加相同的围压, 两模型选取相同的力学参数($E = 78000 \text{ MPa}$, $\mu = 0.26$), “偏心”模型的偏心距为 20 mm , 讨论岩心截面应力分布特征, 模型分别施加 100 MPa 的围压, 最大主应力计算结果见图 1。

有限元计算结果表明, 当钻孔出现偏心时, 无论应力的分布状态还是应力大小与“同心”钻孔相比均发生了明显的改变, 两小孔内壁的应变和位移均

[收稿日期] 2002-06-11; **[修订日期]** 2002-11-28; **[责任编辑]** 苗国航。

[基金项目] 国家自然科学基金项目(编号: 49572144)资助。

[作者简介] 邵兆刚(1970年-), 男, 2002年毕业于中国地质大学, 获博士学位, 副研究员, 现主要从事构造动力学、石油地质、地应力测量等方面的工作。

会产生明显改变,这就是说用“偏心”钻孔进行率定,无论是以测量应变为特征的空心包体法,还是以

测量位移为特征的压磁法,“偏心”的存在均会对测量结果产生影响。

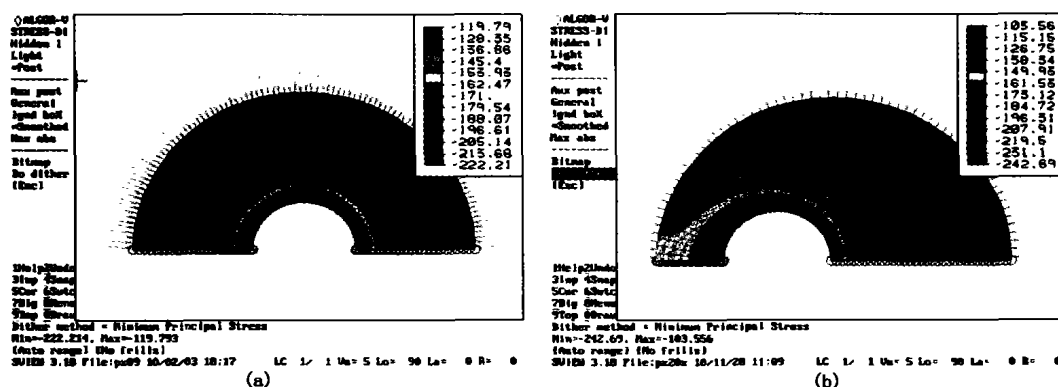


图1 “偏心”和“同心”圆孔围压作用下有限元计算结果

a—“同心”圆孔在围压作用下最大主应力计算结果;b—“偏心”圆孔在围压作用下最大主应力计算结果

2 利用解析法讨论“偏心”钻孔内壁应力和位移分布

若计算出偏心时钻孔内壁应力和位移的分布,就可以对偏心产生的误差进行校正。当岩芯偏心时,求解围压作用下的应力和位移可利用双极坐标进行求解(F H 萨文,1958;许翥中,1989)。

1) 双极坐标的性质

利用保角变换 $z = i \operatorname{acth}(\psi/2)$, 建立的双极坐标系中由 $z = x + iy, \zeta = \xi + i\eta$ 可得

$$x = \frac{\alpha \sin \eta}{\cosh \xi - \cos \eta}; y = \frac{\alpha \sinh \xi}{\cosh \xi - \cos \eta} \quad (3)$$

这时在平面 xoy 上,曲线 $\xi = \text{const}$ 和 $\eta = \text{const}$ 是彼此交成直角的两个圆周(它们的圆心分别位于 ox 和 oy 轴上)。

当 $\xi = \xi_0 = \text{const} > 0$ 时式(14)表示一个圆的参数方程。简化可得:

$$x^2 + (y - \operatorname{acth} \xi_0)^2 = \frac{\alpha^2}{\sinh^2 \xi_0} \quad (4)$$

其圆心 $C(0, \operatorname{acth} \xi_0)$ 在 y 轴上,半径为 $\alpha \operatorname{csch} \xi_0$ 。当 $\xi_0 \rightarrow \pi$ 时,半径趋于零,同时此圆周的圆心趋向 $O(0, \alpha)$,当已知两圆的半径及圆心距后,就可以确定常数 α, ξ_0, ξ_1 (图2)。

通过保角变换,将直角坐标系中的偏心圆域转化为双极坐标系下的同心圆域进行求解。

η 与该点的圆心角 θ 之间关系为(图2):

$$\sin \theta = \frac{x}{R} = \frac{\sinh \xi_1 \sin \eta}{\cosh \xi_1 - \cos \eta} \quad (5)$$

在围压作用下偏心圆环的复应力函数如下^[7]:

$$\varphi(z) = iB_1 \cosh \zeta + ic_1 \sinh \zeta + A_1 z \quad (6)$$

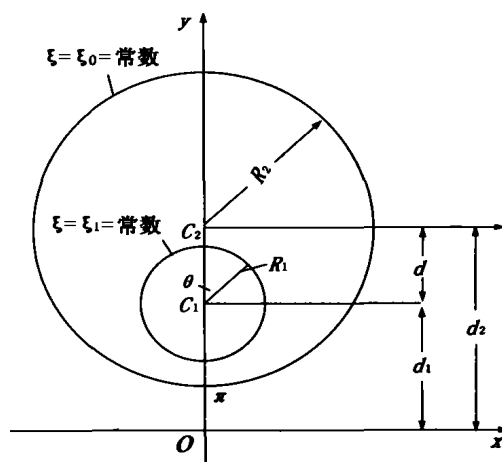


图2 双曲坐标

$$X(z) = \alpha B_1 \sinh \zeta + \alpha c_1 \cosh \zeta + \alpha \quad (7)$$

2) 围压作用下偏心小孔内壁的应力与位移结果

取 $E = 78000 \text{ MPa}, \mu = 0.26, \alpha_{\text{围}} = 100 \text{ MPa}, R_2 = 63 \text{ mm}, R_1 = 19 \text{ mm}$, 可得出不同偏心距下的 $\sigma_\eta(\xi_1, \eta)$ 与 $\theta(\xi_1, \eta)$ 的关系曲线(图3)当 $d = 0$ 时反映出一同心圆受围压情况,其值为—与角度无关的常数,当 d 不为零时, σ_η 随之发生变化,若 $d < R_1/2$ 则极值点位于 $\eta = 0$ 和 $\eta = \pi$ 上,而绝对值最大值位于 $\eta = \pi$ 点,即是在中心连线与内壁最薄部位的交点。

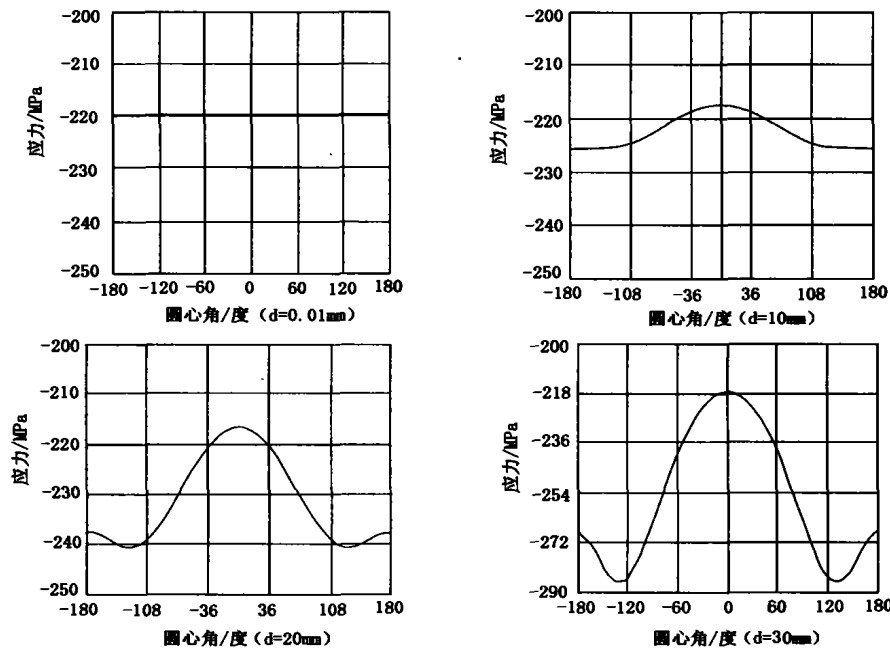
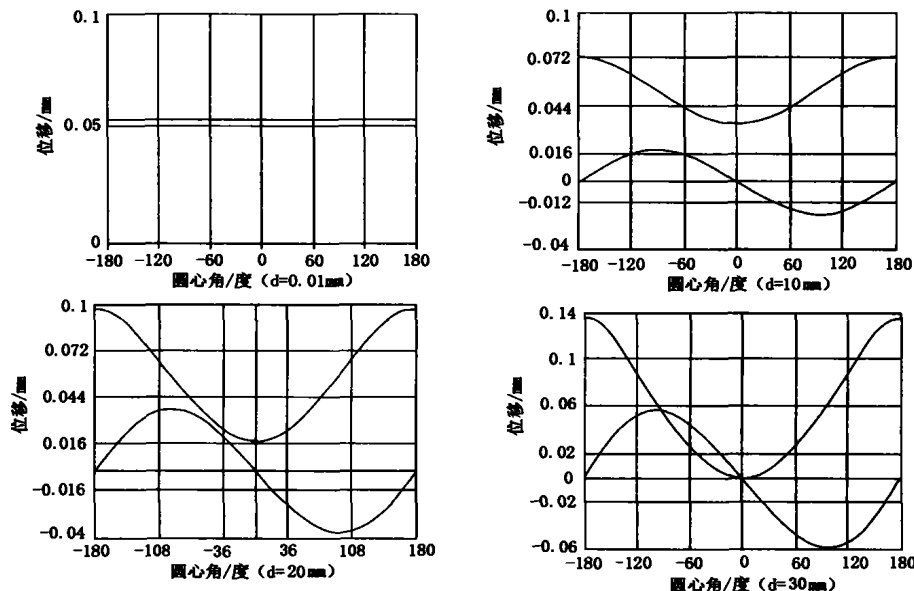
当圆心间的距离 $d > R_1/2$, 那么 σ_η 的极值位于 $\eta = 0, \cos \eta = -R_1/2d$ 和 $\eta = \pi$, 而绝对值最大的压应力 σ_η 在点 $\cos \eta = -R_1/2d$ 上。如图2所示。应力大小随偏心距的增加显著偏离原来的直线,相应的小孔应变的偏差亦随偏心距的增大而显著增加的,当 $d = 30 \text{ mm}$ 时,产生的应变偏差可达到 30.0%(表1)。

表1 不同偏心距下小孔内壁应变特征

偏心率 $d/R_2/\%$	0.051	15.9	31.7	47.6
η 值	$\eta = \pi$	$\eta = \pi$	$\cos\eta = -R_1/2d$	$\cos\eta = -R_1/2d$
孔壁应变 $\varepsilon_\eta \times 10^{-3} \text{ mm}$	-2.82064	-2.89282	-3.08205	-3.66897
孔壁应变偏差 $(\varepsilon_\eta - \varepsilon_\eta(d=0))/\varepsilon_\eta(d=0)/\%$	0.1	2.6	9.3	30.0

在偏心情况下小孔位移特征见图4, 图中两条曲线分别表示小孔的径向位移和切向位移, 在 $d =$

0.01 mm 时, 切向位移为零而只有径向位移, 且径向位移为一平行 X 轴的直线, 代表同心圆环受围压下的位移特征, 当偏心距逐渐加大, 径向位移变为曲线, 在 $\eta = 0$ 和 $\eta = \pi$ 处出现极值, 绝对值最大值位于 $\eta = \pi$ 点, 即是在中心连线与内壁最薄部位的交点, 最小值位于 $\eta = 0$ 点, 即中心连线与内壁最厚部位的交点。切向位移也随之出现, 并逐渐增大, 曲线关于坐标原点对称。其绝对值最大值点逐渐向中心连线底部 ($\eta = \pi$) 偏移。

图3 不同偏心距下小孔内壁应力 σ_η 与内圆圆心角 θ 关系图4 不同偏心距下小孔内壁位移与内圆圆心角 θ 关系

1—小孔内壁径向位移关于 Y 轴对称; 2—小孔内壁切向位移关于原点对称

对于孔径变形法地应力测量,所测变形应为孔壁两端位移的总和,当 $d = 30 \text{ mm}$ 时,在 $\eta = 0, \pi$ 处应变偏差可达到 28.1% (表 2)。

表 2 不同偏心距下小孔内壁位移特征

偏心率 $d/R_2/\%$	0.051	15.9	31.7	47.6
孔壁位移 $u_\eta (\eta = \pi)$	0.054	0.074	0.098	0.14
孔壁位移偏差 $u_\eta/u_{\eta(d=0)} (\eta = \pi)$	1.000	1.382	1.819	2.519
孔壁直径偏差 $u_{\eta=\pi} + u_{\eta=0}/2u_{\eta(d=0)}/\%$	0.1	1.5	8.0	28.1

3 钻孔偏心数据校正实例

根据计算得到的钻孔偏心误差,可以对实际测量中的“偏心”误差进行修正。

应力解除法结果见表 1, 钻孔直径 $\phi 130 \text{ mm}$, 测量孔直径 $\phi 36 \text{ mm}$, 第一次解除时岩心出现显著偏心, 其偏心距为 12 mm, 第二解除无明显偏心现象, 从解除结果可以看出, “偏心”钻孔计算结果与正常小孔测量结果相比测值明显偏小。

表 3 两次应力解除数据表

次 数	第一次解除			第二次解除		
方位 $^\circ$	57	357	297	55	355	295
记录应力/MPa	38.3	80.3	52.9	45.2	83.5	43.8
最大值 $\sigma_{\max}/\text{MPa}$		81.8			83.5	
最小值 $\sigma_{\min}/\text{MPa}$		32.5			31.5	
最大主应力方位 $^\circ$		347.0			355.9	

1) 校正与讨论

对第一次解除数据进行校正, 解除岩层位于花岗岩中, 岩心完整, 三个传感器对应的圆心角为 $\theta_1 = -58.5^\circ$ 、 $\theta_2 = 1.5^\circ$ 和 $\theta_3 = 61.5^\circ$, 由式(6)、(7)可得出围压作用下的内壁位移, 这里将传感器两端求出的位移相加作为总位移 u' 。

$$\sigma = \frac{Eu'}{3\alpha} = \frac{Eu}{3\alpha} \frac{u'}{u} = \sigma' \frac{u'}{u} \quad (8)$$

测得花岗岩岩心参数为 $E = 78000 \text{ MPa}$ 、 $m =$

0.26, 校正后结果见表 4。

校正前后应力值与第二次解除测量结果见表 5, 由表中可知, 校正后两次结果与校正前相比更加一致。

表 4 第一次解除数据校正结果

项 目	校正前			校正后			误差
方位 $^\circ$	57	357	297	57	357	297	-
记录应力/MPa	38.3	80.3	52.9	38.8	82.39	53.6	-
最大值 $\sigma_{\max}/\text{MPa}$		81.8			83.9		2.6%
最小值 $\sigma_{\min}/\text{MPa}$		32.5			32.7		0.61%
最大主应力方位 $^\circ$		347.0			347.5		0.14%

表 5 第一次应力解除数据校正与第二次应力解除结果对比

项 目	最大值 $\sigma_{\max}/\text{MPa}$	最小值 $\sigma_{\min}/\text{MPa}$	最大主应力方位 $^\circ$	备 注
第一次解除	81.8	32.5	347.0	
校正后	83.9	32.7	347.5	
第二次解除	83.5	31.5	355.9	

由上面结果讨论可知偏心会对地应力结果产生明显影响, 由于围压率定法本身的优点, 该方法在套心法地应力测量中已经得到普及, 因此对围压下的钻孔偏心数据进行校正有着很大的现实意义。

[参考文献]

- [1] 蔡美峰, 乔 兰, 李华斌, 等. 地应力测量原理和技术[J]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [2] 丁原辰. 标定传感器的新方法[A]. 国家地震局地震地质大队, 中国地质科学院地质力学研究所. 地质力学文集第三集[C]. 北京: 地质出版社, 1979.
- [3] 郭守忠. 水电工程中地应力测试孔的钻进[J]. 地质与勘探, 1985, 21(9): 70~71.
- [4] 王连捷, 潘立宙, 廖椿庭. 地应力测量及其在工程上的应用[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [5] 王连捷, 任希飞, 丁原辰, 等. 地应力测量在采矿工程中的应用[M]. 北京: 地震出版社, 1994.
- [6] 许翥中. 弹性力学中的复变函数方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- [7] F H 萨文. 孔附近的应力集中[M]. 北京: 科学出版社, 1958.

HOLE DEVIATION - A PROBLEM NOT TO BE IGNORE IN OVERCORING CRUSTAL STRESS MEASUREMENT

SHAO Zhao - gang¹, MENG Xian - gang¹, FENG Xiang - yang², Wang Jin¹, DING Yuan - chen¹

(1. Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing 100081; 2. National Labory of Geology, NLG, Beijing 100031)

Abstract: In this paper, analytical result of strain and displacement in small hole inner wall are made out, and the error between deviation and no deviation is discussed, it shows the error obviously increases with declination of small hole strain and displacement. In this paper, When $d = 30\text{mm}$, strain deviation is 30%, and hole diameter deviation is 28%. Maintenance angle transformation is used to change two - deviation circles boundary into regular boundary in calculation, and the measured data in crustal stress piezomagnetic measurement are corrected.

Key words: stress relieve, hole deviation, crustal stress, confining pressure rating, maintenance angle transformation, finite element analysis