

基于自锁概念的岩体弱面破坏模型与规律研究

张广清, 陈 勉

(中国石油大学(北京)石油天然气工程学院, 北京 102249)

摘 要: 采用摩擦学中的自锁概念提出了确定弱面破坏的模型和分析方法, 物理概念简单明确。采用自锁概念分析二维弱面破坏与采用莫尔-库仑定律得到的结果一致。三维弱面模型在弱面与中间主应力平行和中间主应力等于最小主应力两种情况下, 可退化为二维弱面问题。研究结果表明: 主应力、弱面力学参数对空间弱面破坏角度范围的影响显著, 包括破坏角度范围大小和形态变化两个方面。随着弱面力学参数的增加, 空间弱面破坏角度范围有变小的趋势, 当弱面力学参数达到一定数值后, 岩体中的弱面倾角和走向取任意值, 岩体均不会发生弱面破坏。随着中间主应力和最小主应力的增加, 空间弱面破坏角度范围具有变小的趋势。通过建立局部坐标系, 得到了裂隙性地层井壁发生失稳的弱面角度随井底压力变化的规律。

关键词: 自锁; 摩擦锥; 三维弱面; 莫尔-库仑定律

中图分类号: TU458

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)07-1052-07

作者简介: 张广清(1975-), 男, 山东宁津人, 副教授, 博士, 主要从事石油工程岩石力学与岩土工程的研究。E-mail: zhangguangqing@vip.163.com。

Rock mass failure with self-locking concept

ZHANG Guang-qing, CHEN Mian

(School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: A three-dimensional model for rock mass failure is proposed based on the self-locking concept in friction analysis. In case of two-dimensional problems, the model gives the same results as those of Mohr-Coulomb criterion. And the three-dimensional model can be reduced to traditional two-dimensional model if the weak plane is parallel to the middle principal stress and/or the middle stress is equal to the minimum principal stress. The results indicate that the influences of the principal stresses and mechanical parameters of the weak plane on the spatial failure region are remarkable in terms of shape and range, that the spatial failure region becomes smaller as the mechanical parameters increase, and that the weak plane will never fail when some threshold of mechanical parameters is reached, no matter what values of weak plane strike and dip will be. And the spatial failure region becomes smaller with the increased values of the middle and minimum principal stresses. Then, the influence of bottom hole pressure on the failure range of weak plane is analyzed for bore holes in naturally fractured formation, with the help of the local coordinate system.

Key words: self-locking; cone of friction; three-dimensional weak plane; Mohr-Coulomb criterion

0 引 言

裂隙岩体中的结构面(弱面)纵横交错, 往往成组出现, 每组的倾角和走向各不相同。弱面参数对岩体强度和稳定性具有非常重要的影响。为分析问题的方便, 经常将三维弱面简化为二维问题, 即仅考虑弱面的走向, 不考虑弱面的倾角^[1]。在二维弱面分析中一般采用弱面的莫尔-库仑定律^[2]。岩土工程分析中已考虑弱面参数的影响, 如洞室稳定分析中的数值分析方法^[3-5], 含弱面煤层开采引起的地表变形^[6]。石油钻井中, 地层弱面的存在影响到井壁稳定性^[7-8]。弱面对岩体的动力学响应也有影响^[9], 如岩体中的弱面参

数影响爆破效果^[10]。弱面岩体的参数分布可通过力学实验或概率估算方法^[11]及反算方法求得。

实际岩体中弱面一般是三维的, 简化后的二维弱面模型可能会造成较大误差。由于莫尔-库仑模型借助莫尔圆和临界破坏线的几何关系, 因此在分析三维弱面时存在较大难度。自锁是理论力学中摩擦学部分的一个重要概念。全约束力与法线间的夹角的最大值,

基金项目: 国家自然科学基金项目(90510005); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20070425026)

收稿日期: 2008-04-25

称为摩擦角。由于合外力的方向可以改变, 全约束力作用线的方位也随之改变, 因此在空间形成以接触点为顶点的锥面, 称为摩擦锥。如果作用于物体的全部主动力的合力的作用线在摩擦角之外, 无论这个力多么小, 物体会滑动; 而如果作用于物体的全部主动力的合力的作用线在摩擦角之内, 无论这个力多么大, 物体不会滑动。这种现象称为自锁。

由于理论力学研究的对象是刚体, 因此对发生自锁的物体理论上可以承受无限大的外力, 但实际物体均不可能为刚体也不能承受无限大外载。因此对发生自锁的物体, 当外力达到一定值后, 虽然滑动面不一定首先发生滑动, 但可能在其他位置发生破坏, 即此时结构面和岩石发生破坏都是可能的。滑动面发生自锁相当于岩体弱面不会发生破坏, 相反为岩体弱面发生破坏。

本文采用自锁概念建立了分析岩体弱面破坏的模型和方法, 并着重分析了三维弱面的破坏范围和规律。

1 采用自锁概念建立二维弱面破坏模型

岩体弱面破坏角度范围一般是通过弱面的莫尔-库仑准则求得的, 见图 1。

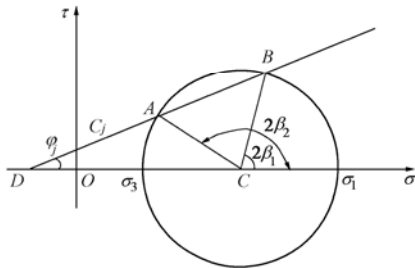


图 1 弱面的莫尔-库仑准则

Fig. 1 Mohr-Coulomb criterion of weak planes

直线 AB 为岩体弱面的强度极限曲线, φ_j 为弱面的内摩擦角, C_j 为弱面的黏聚力, β_1 和 β_2 为岩体弱面破坏的角度范围, 可以根据几何关系得

$$\beta_1 = \frac{1}{2} \sin^{-1} \left(\frac{\sin \varphi_j (2C_j \cot \varphi_j + \sigma_1 + \sigma_3)}{\sigma_1 - \sigma_3} \right) + \frac{\varphi_j}{2}, \quad (1)$$

$$\beta_2 = \frac{\pi}{2} - \beta_1 + \varphi_j. \quad (2)$$

对于二维弱面情况, 当 β 在 $\beta_1 \sim \beta_2$ 间变化时, 破坏发生在弱面上, 否则破坏发生在岩石中。

下面根据摩擦锥的概念确定弱面破坏的角度范围。如图 2 (a), 可直接由弹性力学中的结果或由力平衡原理, 求得弱面上由 σ_1 和 σ_3 引起的正应力 σ 和剪应力 τ 分别为

$$\sigma = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta + \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3), \quad (3)$$

$$\tau = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta, \quad (4)$$

式中, β 为弱面与水平线 (σ_3 方向) 的夹角。

在弱面上进行受力分析, 如图 2 (a), 弱面发生滑动时, 沿弱面滑动方向的剪切滑动力为 $\tau - C_j$ (剪力 τ 超过黏聚力 C_j 的部分), 垂直于弱面的压力为 σ , 二者的合力为 F_R ,

$$F_R = \sqrt{\sigma^2 + (\tau - C_j)^2}, \quad (5)$$

$$\tan \theta = \frac{\tau - C_j}{\sigma}, \quad (6)$$

式中, C_j 为弱面的黏聚力。

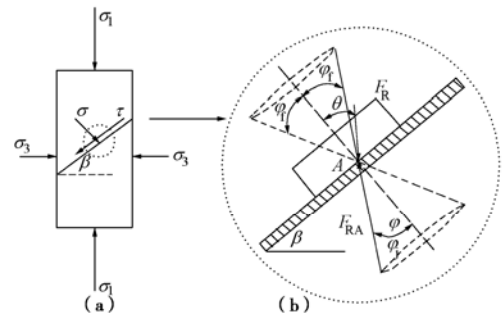


图 2 弱面上的摩擦锥

Fig. 2 The cone of friction on weak plane

令合外力 F_R 与法线间的夹角 $\theta \geq \varphi_j$ (岩石弱面相当于滑动面, 岩石内摩擦角相当于摩擦面的摩擦角, 故 $\varphi_j = \varphi_f$), 弱面不会发生自锁现象, 即发生弱面破坏, 见图 2 (b)。

$$\tan \theta = \frac{\tau - C_j}{\sigma} \geq \tan \varphi_j. \quad (7)$$

将式 (3), (4) 代入式 (7) 中并求解得

$$\beta_1 = \frac{1}{2} \cos^{-1} \left(\frac{\cos^2 \varphi_j (S - M)}{\sigma_3 - \sigma_1} \right), \quad (8)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{2} \cos^{-1} \left(\frac{\cos^2 \varphi_j (S + M)}{\sigma_3 - \sigma_1} \right), \quad (9)$$

式中,

$$S = \sigma_1 \tan^2 \varphi_j + \sigma_3 \tan^2 \varphi_j + 2C_j \tan \varphi_j, \quad (10)$$

$$M = [\sigma_1^2 + \sigma_3^2 - 2\sigma_1 \sigma_3 (2 \tan^2 \varphi_j + 1) - 4C_j^2 - 4(\sigma_1 + \sigma_3) \tan \varphi_j C_j]^{\frac{1}{2}}. \quad (11)$$

虽然式 (8)、(9) 和式 (1)、(2) 的形式不同, 但通过变换可以发现二者分别相等。说明通过自锁概念确定的弱面破坏角度范围与通过莫尔-库仑定律得到的结果相同。实际上式 (1)、(2) 是在局部坐标中用 τ 和 σ 表示的, 而式 (8)、(9) 是在整体坐标中用 σ_1

和 σ_3 表示的, 两种表示本质上是一致的。

当弱面内有孔隙压力时, 岩体弱面破坏的角度范围 β_1 和 β_2 会发生什么样的变化?

由图 3 可见, β_1 减小同时 β_2 增加, 即随着作用在弱面上的液体压力 (裂隙压力) 增加, 弱面发生破坏的角度范围增加, 即弱面变得更加容易滑动。

实际上, 上述结论可根据自锁概念容易得到。由于裂隙压力与正压力的作用方向相反, 将式 (7) 变为

$$\tan \theta = \frac{\tau - C_j}{\sigma - p} \geq \tan \varphi_j \quad (12)$$

式 (12) 中 p 增加使得式 (12) 更容易满足, 对应不会发生自锁现象, 即弱面变得更加容易滑动。

自锁概念的物理含义非常直观, 仅需要理解合力平衡的原理就可以得到弱面破坏的角度范围。

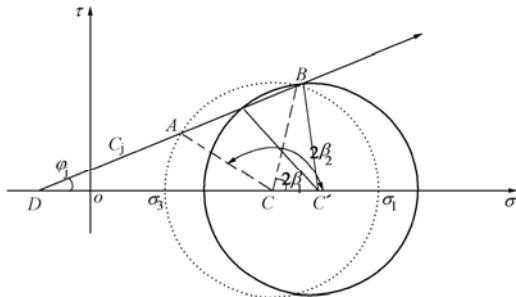


图 3 弱面上液体压力增加导致弱面破坏范围的变化

Fig. 3 Variation of β_1 and β_2 caused by increased pore pressure on the weak plane

2 采用自锁概念确定三维弱面的破坏规律

二维弱面破坏的角度范围仅涉及一个角度 β , 而对三维弱面, 其破坏的角度范围涉及两个独立的角度, 如 β 和 γ (第三个角度 α 不独立)。这样, 两个角度 β 和 γ 的范围确定了一个平面区域, 在这个平面区域内, 岩体弱面发生破坏; 在这个区域之外, 岩石发生破坏。显而易见, 三维弱面破坏区域的面积和位置与受力和材料参数有关, 并且破坏区域越小, 岩体越容易保持稳定。

要确定三维弱面的破坏区域, 采用莫尔-库仑准则几乎是不可能的, 但采用自锁的概念, 能够非常容易的完成。

2.1 三维模型

考虑在三维应力空间中一个弱面, 其空间位置可用弱面法线的方向角表示。为了尽量与二维弱面情况一致, 弱面法线与三个应力主轴 σ_1 , σ_2 , σ_3 的夹角分别为 β , γ , α , 见图 4。

在主应力空间中, 弱面上的正应力和剪应力分别

为

$$\sigma = \sigma_3 \cos^2 \alpha + \sigma_1 \cos^2 \beta + \sigma_2 \cos^2 \gamma \quad (13)$$

$$\tau = \sqrt{F_R^2 - (\sigma_3 \cos^2 \alpha + \sigma_1 \cos^2 \beta + \sigma_2 \cos^2 \gamma)^2} \quad (14)$$

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1 \quad (15)$$

$$F_R = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2} = \sqrt{\sigma_1^2 \cos^2 \beta + \sigma_2^2 \cos^2 \gamma + \sigma_3^2 \cos^2 \alpha} \quad (16)$$

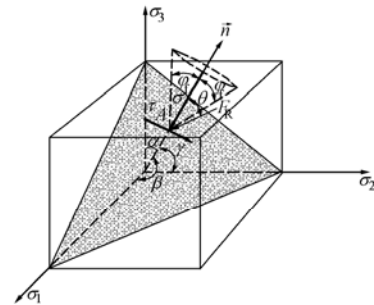


图 4 三维弱面及其摩擦锥

Fig. 4 A three-dimensional weak plane and the cone of friction

同时考虑空间弱面的黏聚力和弱面内的孔隙压力, 不发生自锁的条件, 见图 4, 即三维弱面发生破坏的条件为

$$\tan \theta = \frac{\tau - C_j}{\sigma - p} \geq \tan \varphi_j \quad (17)$$

将式 (13), (14) 代入式 (17) 得

$$\tan \varphi_j \leq \frac{\sqrt{\sigma_1^2 \cos^2 \beta + \sigma_2^2 \cos^2 \gamma - \frac{1}{2}(\cos 2\beta + \cos 2\gamma)\sigma_3^2 - N - C_j}}{\sigma_1 \cos^2 \beta + \sigma_2 \cos^2 \gamma - \frac{1}{2}(\cos 2\beta + \cos 2\gamma)\sigma_3 - p} \quad (18)$$

式中,

$$N = \left(\sigma_1 \cos^2 \beta + \sigma_2 \cos^2 \gamma - \frac{1}{2}(\cos 2\beta + \cos 2\gamma)\sigma_3 \right)^2 \quad (19)$$

为简化分析, 假定式 (18) 中的 $p = 0$, 得到 β 的范围:

$$\beta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{\cos \varphi_j}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{K_1 + \sigma_1 + \sigma_3 - 2C_j \tan \varphi_j}{\sigma_1 - \sigma_3}} \right), \quad (20)$$

$$K_1 = S - 2(\sigma_2 \cos^2 \gamma + \sigma_3 \sin^2 \gamma) \sec^2 \varphi_j, \quad (21)$$

式中,

$$\beta_2 = \sec^{-1} \left(\frac{2\sqrt{\sigma_1 - \sigma_3}}{\sqrt{K_2 + (2\cos 2\gamma + \cos 2\varphi_j - 1)\sigma_3 - 2V \cos \varphi_j}} \right), \quad (22)$$

$$K_2 = -4\sigma_2 \cos^2 \gamma - 2C_j \sin 2\varphi_j + 2\sigma_1 \cos^2 \varphi_j, \quad (23)$$

$$V = [4\sigma_2(\sigma_2 - \sigma_3)\cos^2 \gamma + (\sigma_1^2 + \sigma_3^2 - 4C_j^2)\cos^2 \varphi_j -$$

$$2C_j(\sigma_1 + \sigma_3)\sin 2\varphi_j + H]^{\frac{1}{2}}, \quad (24)$$

$$S = \{4\sigma_2(\sigma_2 - \sigma_3)\cos^2 \gamma \sec^2 \varphi_j + H \sec^2 \varphi_j +$$

$$\sigma_1^2 + \sigma_3^2 - 4C_j[C_j + (\sigma_1 + \sigma_3)\tan \varphi_j]\}^{\frac{1}{2}}, \quad (25)$$

$$H = \sigma_1[\sigma_3(2\cos 2\gamma + \cos 2\varphi_j - 1) - 4\sigma_2 \cos^2 \gamma]. \quad (26)$$

假定弱面法线与 σ_2 垂直且 $p = 0$, 那么 $\gamma = \frac{\pi}{2}$, 式 (18) 化简为

$$\tan \varphi_f \leq \frac{-C_j + \cos \beta \sin(\beta)(\sigma_1 - \sigma_3)}{\sigma_1 \cos^2 \beta + \sigma_3 \sin^2 \beta} \cdot \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\beta - 2C_j}{(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\beta + (\sigma_1 + \sigma_3)}, \quad (27)$$

式 (27) 实际上为二维弱面下的形式。

2.2 弱面破坏角度范围的规律分析

下面根据式 (20)、(21) 分析三维弱面发生破坏的角度范围。为了分析问题的方便及便于与二维情况下的结果对比, 假设三维弱面内的孔隙压力为零。

取内摩擦角 $\varphi_i = 20^\circ$, 弱面黏聚力 c_i 为 3 MPa, 3 个主应力分别为 $\sigma_1 = \sigma_v = 40$ MPa, $\sigma_2 = \sigma_H = 32$ MPa, $\sigma_3 = \sigma_h = 24$ MPa。弱面参数和地应力取值以地层深度为 1500 m 的岩心岩石力学实验实测数据为准。图 5 中的虚线边界表示 β 角的上限, 实线边界表示 β 角的下限, 由虚线和实线包括的阴影区表示不自锁区域, 对应弱面发生破坏的角度范围, 阴影区域之外是岩石发生破坏的角度范围。在实际岩体稳定性分析中, 只要确定了边界的应力、弱面的力学性质参数及空间弱面的倾角和走向 (二者与法线方向存在定量关系), 就可以根据图 5 提供的图板来判断岩体破坏的类型。

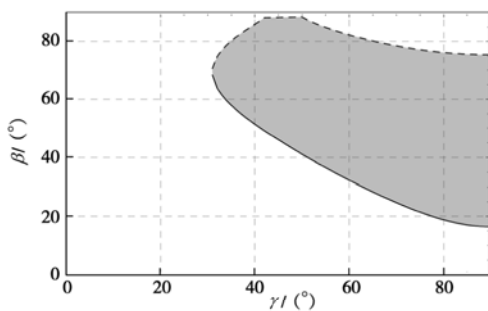


图5 弱面破坏角度范围

Fig. 5 Closed region of a three-dimensional weak failure

图 5 为 3 个主应力及弱面参数一定的情况下的结果。当弱面的力学参数或 3 个主应力发生变化时, 空间弱面破坏的角度范围也会变化, 下面分 4 个方面进行分析。

(1) 三维弱面内摩擦角对破坏角度范围的影响

弱面黏聚力 c_i 为 3 MPa, 3 个主应力分别为 $\sigma_1 = 40$ MPa, $\sigma_2 = 40$ MPa, $\sigma_3 = 24$ MPa, 内摩擦角 φ_i 从

0° 增加到 9° 。

见图 6, 不同内摩擦角下弱面破坏角度范围不同, 图中的数字分别表示各个内摩擦角的数值, 可见随着三维弱面内摩擦角的增加, 弱面破坏的角度范围逐渐缩小。内摩擦角是弱面强度参数之一, 内摩擦角增加表示弱面强度增加, 弱面发生破坏的几率减小。根据图 6 表示的结果趋势, 可见当内摩擦角达到一定数值后, 三维弱面的破坏区域为零, 即无论三维弱面的倾角和走向如何变化, 均不会发生弱面破坏, 岩体在给定外载作用下始终保持稳定。

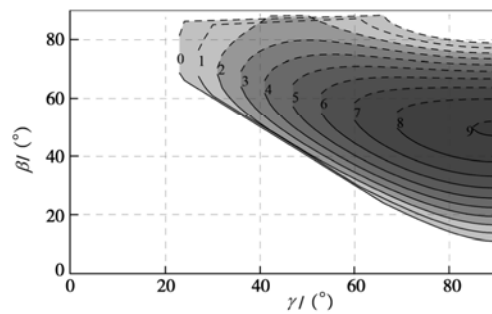


图6 内摩擦角变化对弱面破坏角度范围的影响

Fig. 6 Effect of internal friction angle on failure of three-dimensional weak plane

这样对于存在多组三维弱面的岩体, 可以根据实验测试结果结合图 6 判断哪些弱面保持稳定, 而哪些弱面容易发生破坏。

值得注意的是, 随着弱面中水的进入, 弱面的内摩擦角也在减小, 弱面发生破坏的范围扩大, 与图 6 所示的结果一致。在裂缝性地层钻井中, 钻井液进入地层使得井壁变得不稳定实际上有两个方面的原因: ①钻井液引起的裂缝面上内摩擦角的减小; ②作用于裂缝壁面上的水压力增加, 引起作用于壁面上的有效正压力减小, 使得弱面变得更加不稳定。

(2) 三维弱面黏聚力对破坏角度范围的影响

内摩擦角 $\varphi_i = 2^\circ$, 3 个主应力分别为 $\sigma_1 = 40$ MPa, $\sigma_2 = 32$ MPa, $\sigma_3 = 24$ MPa, 黏聚力 c_i 从 0 增加到 6 MPa。

见图 7, 不同黏聚力下弱面破坏角度范围不同, 图中的数字分别表示各个黏聚力的数值, 可见随着三维弱面黏聚力从 2 MPa 到 6 MPa 的增加, 弱面破坏的角度范围逐渐缩小。黏聚力也是弱面强度参数之一, 黏聚力增加表示弱面强度增加, 弱面发生破坏的几率减小。

根据图 7 表示的结果趋势, 可见当黏聚力达到一定数值后, 三维弱面的破坏角度范围为零, 即无论三维弱面的倾角和走向如何变化, 均不会发生弱面破坏, 岩体在给定外载作用下始终保持稳定。

需要注意的是, 当黏聚力分别为 0, 1 MPa 时,

三维弱面的破坏角度范围为条带状, γ 角的范围靠近 90° 且很窄, 但 β 角的范围很宽, 几乎从 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。

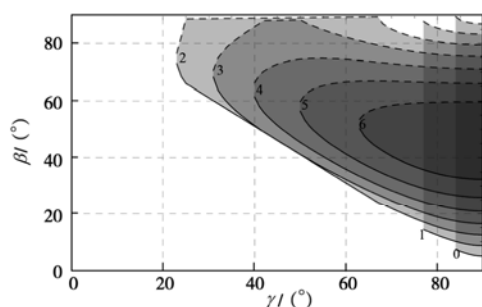


图 7 黏聚力变化对弱面破坏角度范围的影响

Fig. 7 Effect of cohesive force on failure of three-dimensional weak plane

(3) 最小应力变化对破坏角度范围的影响

内摩擦角 $\varphi_i = 2^\circ$, 弱面黏聚力 c_i 为 3 MPa, 最大和中间主应力分别为 $\sigma_1 = 40$ MPa, $\sigma_2 = 32$ MPa, 最小应力 σ_3 从 20 MPa 增加到 31.5 MPa。

见图 8, 不同最小应力下弱面破坏角度范围不同, 图中的数字分别表示各个最小应力的数值, 可见随着最小应力从 22 MPa 到 31.5 MPa 的增加, 弱面破坏的角度范围逐渐缩小。根据岩石材料剪切破坏的机理, 最小应力增加后 3 个应力之间的差值减小, 导致剪应力减小, 弱面发生破坏的几率减小。

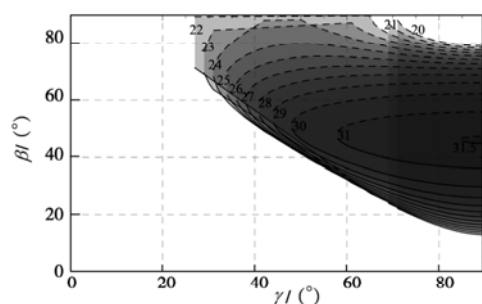


图 8 最小应力变化对弱面破坏角度范围的影响

Fig. 8 Effect of the minimum stress on failure of three-dimensional weak plane

根据图 8 表示的结果趋势, 可见当最小应力达到一定数值后, 如 31.5 MPa, 三维弱面的破坏角度范围几乎为零, 即无论三维弱面的倾角和走向如何变化, 均不会发生弱面破坏, 岩体在给定外载作用下始终保持稳定。

同时, 当最小应力分别为 20, 21 MPa 时, 三维弱面的破坏角度范围为条带状, γ 角的范围靠近 $70^\circ \sim 90^\circ$, 但 β 角的范围很宽, 几乎从 $20^\circ \sim 80^\circ$ 。

(4) 中间应力变化对破坏角度范围的影响

内摩擦角 $\varphi_i = 2^\circ$, 弱面黏聚力 c_i 为 3 MPa, 最大和最小主应力分别为 $\sigma_1 = 40$ MPa, $\sigma_3 = 24$ MPa, 中间

应力 σ_2 从 24 MPa 增加到 40 MPa。

见图 9, 不同中间应力下弱面破坏角度范围不同, 图中的数字分别表示各个中间应力的数值。为了清晰表示, 将中间主应力 24~31 MPa 的结果放在图 9 中, 将中间主应力 32~40 MPa 的结果放在图 9 (b) 中。

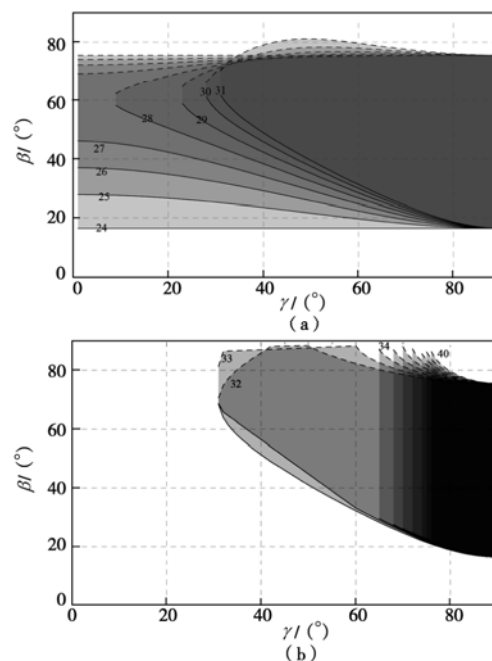


图 9 中间应力变化对弱面破坏角度范围的影响

Fig. 9 Effect of middle stress on failure of three-dimensional weak plane

由图 9 (a), 当中间应力为 24 MPa 时, β 的上限线和下限线平行, 说明 β 的范围与 γ 角无关。实际上, 当中间应力为 24 MPa 时, 中间应力与最小应力相同, 便成为二维弱面问题, 与二维公式的计算相同, $\beta_1 = 16.5^\circ$, $\beta_2 = 75.5^\circ$ 。

随着中间主应力的增加, 弱面破坏角度范围逐渐由矩形向右上缩小, 三维弱面破坏向 γ 角度增大的位置移动。当中间主应力达到 34 MPa 之后, 弱面破坏角度范围集中在 $65^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ \cap 20^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ 之间。说明中间应力对三维弱面破坏具有明显的影响。

值得注意的是, 图 9 中, 当 $\gamma = 90^\circ$ 时的 β 的范围与用式 (1)、(2) 的计算结果 $\beta_1 = 16.5^\circ$, $\beta_2 = 75.5^\circ$ 相同, 这时也对应二维弱面问题。

3 应用实例

连续地层的井壁稳定研究已经比较充分, 而在存在多组弱面的情况下, 大多数的井壁稳定分析没有考虑到天然裂缝(弱面的影响), 尤其是三维弱面的影响。由于地层中的弱面分布呈现一定的随机性, 那么在井壁周围会形成不规则的弱面分布。

长 6-1 油层某井钻井按照连续地层井壁稳定分析

发现, 虽然提高了井底压力, 但还是发生了部分井壁坍塌现象。为了寻找发生井壁坍塌的原因, 采用本文提出的模型和方法研究连续地层假设和存在弱面下的井壁坍塌的范围。

由于钻孔的存在产生了应力集中, 因此不能直接使用 3 的分析规律。为了方便研究任意空间弱面的影响, 仍在主应力空间讨论。在井壁上建立局部坐标系, 由于井壁上没有剪切应力, 径向应力、环向应力和垂向应力总对应 3 个主应力。相对于局部直角坐标系 $o'xyz$, 存在一个三维弱面, 三维弱面法线与局部直角坐标系 3 个轴的夹角为 β , γ , α (假设分别对应 x , y , z 3 个坐标轴)。当 $\alpha=0$ 时弱面法线与 $O'x$ 的夹角为 β , 转化为二维问题。该井取心发现, 油层发育多组天然裂缝, 均为高角度, 接近垂直, 可以简化为二维问题讨论。

首先讨论局部坐标系 $O'xyz$ 与整体坐标系 $OXYZ$ 之间的关系。 $O'z$ 和 OZ 始终一致, 仅其余两轴发生转动, 见图 10。虚线表示天然裂缝的可能位置, θ 表示裂缝沿井筒的位置, 而 δ 表示在井筒 θ 角处的相对变化角度。当 $\delta=0$ 时表示裂缝穿过井筒圆心; 而当 $\delta \neq 0$ 时表示裂缝不通过井筒圆心。 δ 为正表示逆时针离开局部坐标系横轴的数值; δ 为负表示顺时针离开局部坐标系横轴的数值。这样, 用两个角度 θ 和 δ 就可以表示二维天然裂缝全部可能的分布。同时, 比较容易建立两个角度 θ 和 δ 的组合与裂缝在大地坐标系中走向之间的关系。

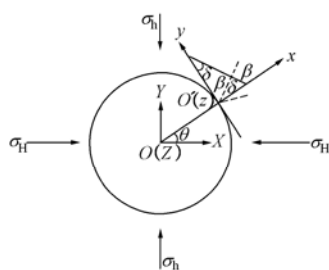


图 10 裂缝性地层井壁稳定分析的局部坐标系

Fig. 10 Local coordinates on well-bore

在三维应力 σ_v , σ_h , σ_H 作用下, 同时考虑井内泥浆压力 P_m 和地层孔隙压力 P_0 , 井壁上的应力^[12]分别为 $\sigma_{\theta\theta} = \sigma_h + \sigma_H - 2(\sigma_H - \sigma_h)\cos 2\theta - 2P_0 - \Delta P$, $\sigma_{rr} = \Delta P$, $\sigma_{zz} = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h)\cos 2\theta - P_0$, $\Delta P = P_m - P_0$ 。

二个水平远场的地应力大小分别为 $\sigma_H = 32$ MPa, $\sigma_h = 24$ MPa; 地层孔隙压力 $P_0 = 14.5$ MPa, 岩石的抗拉强度 $\sigma_t = 3$ MPa。岩石的剪切强度参数

9 MPa 时的破坏角度范围。图中的竖线表示岩石的剪切破坏线, 剪切破坏线右侧的范围表示岩石发生剪切破坏的 θ 角范围, 随着井底压力的增加, 岩石发生剪切破坏的 θ 角范围逐渐缩小, 到 9 MPa 时井壁上任意处均未发生岩石的剪切破坏。

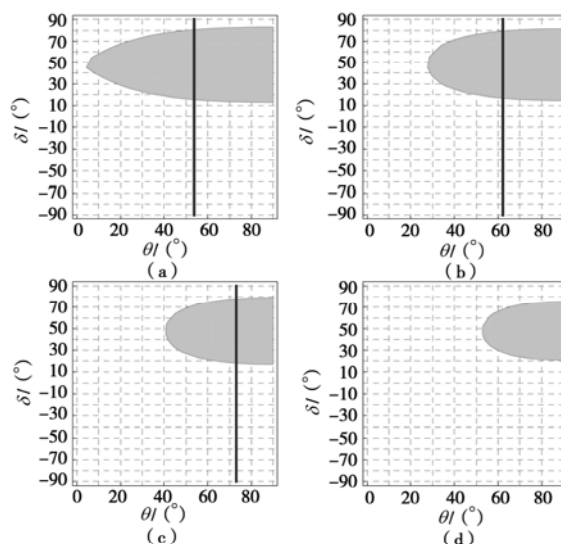


图 11 不同井内压力下的破坏角度范围

Fig. 11 Failure regions under different bottom hole pressures

图 11 中的阴影区表示发生弱面破坏的范围, 用 θ , δ 表示。图 11 (a) 表明当井底压力为零时, 发生岩石剪切破坏的范围是 $\theta = 53^\circ \sim 90^\circ$, 而发生弱面破坏的范围是 $\theta = 9^\circ \sim 90^\circ$ 且相对角度 δ 随 θ 增加而变化, 如当 $\theta = 20^\circ$ 时, 相对角度 $\delta = 20^\circ$ 时井壁能够保持稳定, 而相对角度 $\delta = 40^\circ$ 时井壁不能保持稳定。

按照连续地层假设, 竖线左侧是安全区域, 不会发生井壁坍塌, 但竖线左侧的阴影部分表示弱面发生破坏的范围, 因此连续地层假设过高的估计了井壁的稳定。

将井底压力不断提高, 岩石弱面发生剪切破坏的区域缩小, 但规律相似, 见图 11 (b) ~ (c)。当将井底压力提高到 9 MPa 时, 虽然没有岩石的剪切破坏, 但仍有较大范围的弱面发生剪切破坏, 见图 11 (d)。这与钻井实际一致, 解释了井壁发生坍塌的原因。

4 结 论

本文将理论力学静摩擦的自锁概念推广到具有黏聚力 c_j 和孔隙压力 p 的情况, 并给出了确定弱面破坏的模型和分析方法。并着重分析了二维弱面破坏的细

于自锁概念只与力平衡有关,其物理概念简单明确。

(2)采用自锁概念建立了三维弱面破坏角度范围模型。能够考虑主应力、空间弱面的倾角和走向及弱面力学参数的影响,且可以退化为二维弱面问题。

(3)主应力、弱面力学参数对空间弱面破坏角度范围的影响显著,包括破坏区域大小和形态变化两个方面。随着弱面力学参数的增加,空间弱面破坏角度范围有变小的趋势,当弱面力学参数达到一定数值后,岩体中的弱面无论倾角和走向多大,岩体均不会发生弱面破坏。随着中间主应力和最小主应力的增加,空间弱面破坏角度范围具有变小的趋势。这说明三维弱面的破坏角度范围和规律比二维弱面情况要复杂的多。

(4)采用弱面模型研究了裂缝性地层井壁保持稳定的规律,得到了发生井壁失稳的弱面角度范围。

本文提出的采用自锁概念分析岩体弱面破坏的模型和方法,尤其在分析三维弱面破坏时具有明显的优势。

参考文献:

- [1] 姚再兴,刘向峰,范福平.单一弱面控制岩石力学系统特性[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版).2001,20(4): 151-152. (YAO Zai-xing, LIU Xiang-feng, FAN Fu-ping. A single weak plane controlling over the characteristics of the rock-mechanics system[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2001, 20(4): 151-152. (in Chinese))
- [2] 郑颖人,刘怀恒.弱面体(弱夹层体)力学方法—岩体力学方法[J].水文地质工程地质,1981(5): 10-16. (ZHENG Ying-ren, LIU Huai-heng. Mechanical methods of weak planes-Rock mass mechanical method[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1981(5): 10-16. (in Chinese))
- [3] JEON S, KIM J, SEO Y. Effect of a fault and weak plane on the stability of a tunnel in rock—a scaled model test and numerical analysis[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2004, 41(S): 658-663.
- [4] SHOU K J. A three-dimensional hybrid boundary element method for non-linear analysis of a weak plane near an underground excavation[J]. Tunneling and Underground Space Technology. 2000, 15(2): 215-226.
- [5] 陶纪南.复杂岩体工程有限元分析中地质不连续面的力学模型—高次弱面单元分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版).1987(1): 38-51. (TAO Ji-nan. Mechanical model for finite element analysis in geological discontinuous plane of complex rock mass engineering—element analysis of high order weak plane[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science), 1987(1): 38-51. (in Chinese))
- [6] 戴华阳,王金庄,胡友健.层间弱面引起地表非连续变形的机理分析[J].矿山测量.1999(2): 27-29, 61. (DAI Hua-yang, WANG Jin-zhuang, HU You-jian. Analysis on mechanism of discontinuous ground deformation induced by presence of interlayer weak plane[J]. Mine Surveying, 1999(2): 27-29, 61. (in Chinese))
- [7] MCLELLAN P J A G I, CORMIER K S C L. Borehole instability in fissile, dipping shales, northeastern British Columbia[C]//Calgary Alberta Canada: Society of Petroleum Engineers Inc, 1996.
- [8] PATRICK M. COLLINS Cim, CHOA P G I. Geomechanics and wellbore stability design of an offshore horizontal well, North Sea[C]//Calgary Alberta Canada: Society of Petroleum Engineers Inc, 2002.
- [9] 王来贵,黄润秋,张倬元,等.岩石试件沿弱面滑动的动力学分析[J].中国有色金属学报.1997, 7(4): 13-16. (WANG Lai-gui, HUANG Run-qiu, ZHANG Zhuo-yuan, et al. Theoretical analysis on slipping stability of rock sample mechanics system[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 1997, 7(4): 13-16. (in Chinese))
- [10] 王卫星,邹定祥,马柏令.岩体弱面分布对爆破块度分布的影响及其计算机模拟[J].金属矿山,1986(3): 21-25. (WANG Wei-xing, ZOU Ding-xiang, MA Bai-ling. Influence of distribution of rock mass on blast block distribution and computer simulation[J]. Metal Mine, 1986(3): 21-25. (in Chinese))
- [11] 刘爱华,李夕兵.岩体弱面延展性的概率估算及其应用[J].岩石力学与工程学报,1997, 16(4): 82-86. (LIU Ai-hua, LI Xi-bing. Statistical probability method for the extension of a discontinuous surface in rock mass and its applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(4): 82-86. (in Chinese))
- [12] ZOBACK M D. Reservoir geomechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.