

基于应力椭圆的巷道变形破裂特征 及优化布置

潘兵^{1,2*}, 靖洪文³, 褚卫江^{1,2}

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122;

2. 浙江中科依泰斯卡岩石工程研发有限公司, 浙江 杭州 311122;

3. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 原岩应力是影响巷道围岩稳定的决定因素, 通过选择合理的巷道布置方式, 改善巷道横断面应力分布状态, 是解决巷道围岩变形破裂问题的关键所在. 采用理论分析方法得到了表征巷道断面应力分布的应力椭圆表达式, 并利用FLAC^{3D}数值模拟软件, 分析了不同巷道布置情况下, 围岩变形破裂特征与应力椭圆的关系. 研究表明: 巷道断面应力椭圆大小和分布随其走向不同存在显著差异, 应力椭圆越大, 巷道开挖后应力集中越明显; 随着巷道断面主应力和的增大, 巷道围岩变形和破坏范围也随之增大, 且破坏主要发生在垂直最大主应力方向上, 因此, 最优的巷道布置方式应使应力椭圆最小. 在平顶山十二矿井下进行原岩应力、巷道变形和松动圈实测, 验证了理论分析和数值模拟结果.

关键词: 原岩应力; 应力椭圆; 巷道布置; 变形破裂特征; 数值模拟

中图分类号: TD263

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2020)01-0041-06

Fracture Characteristics and Optimal Layout of Roadway Based on Stress Ellipse

Pan Bing^{1,2}, Jing Hongwen³, Chu Weijiang^{1,2}

(1. Power China Huadong Engineering Corporation Ltd., Hangzhou 311122, China;

2. HydroChina ITASCA Research and Development Center, Hangzhou 311122, China;

3. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The in-situ stress is the most important factor affecting the stability of the surrounding rock of roadway. It is the key to solve the problem of deformation and rupture of the surrounding rock by selecting a reasonable roadway layout to improve the stress distribution of roadway section. Expression of stress ellipse is derived by theoretical analysis, which can characterize the stress distribution of the roadway section. The effect of stress ellipse on roadway deformation and failure feature is studied by numerical simulation experiment. Results show that there are differences in the size and shape of stress ellipse under different layout of roadway. The bigger the stress ellipse is, the larger the displacement and the failure region of roadway is, and the mainly failure region is perpendicular to the direction of maximum principal stress. Therefore, the optimal roadway layout should minimize the stress ellipse. The results of theoretical and numerical simulation are verified by field tests in Pingdingshan No.12 Mine.

Keywords: in-situ stress; stress ellipse; layout of roadway; deformation and failure feature; numerical simulation

原岩应力是地壳岩体内某点的天然应力状态,是造成地下工程围岩体变形和破坏的根本源动力^[1].因此,在原岩应力实测基础上,研究应力场大小和分布对巷道围岩变形和破坏特征的影响规律,对巷道布置及支护设计的科学化具有重要意义^[2].

目前,关于应力场对巷道围岩稳定性影响已取得了大量成果,如鲁岩^[3]等采用理论分析和数值模拟方法,对巷道在构造应力场中不同布置方向的稳定性进行研究,得出当巷道轴向与最大主应力方向平行时,构造应力对巷道稳定性影响最小的结论;孙玉福^[4]采用数值模拟的方法对巷道轴线与最大水平主应力在不同夹角下围岩的变形和破坏特征进行分析,得出随着巷道轴向与最大水平主应力夹角的增大,围岩塑性区和变形不断增加;勾攀峰、张明建^[5,6]等通过物理模拟试验,研究了不同水平应力作用下巷道围岩变形破坏特征,结果表明高水平应力是导致巷道顶板冒落和底板鼓起的主要原因.

以上研究成果多是将原岩应力主方向简化为水平和垂直方向,研究水平应力对巷道布置影响规律,但实际巷道稳定性是由其横断面上的二维应力分布特征决定^[7],而不仅仅是水平应力.本文在实测三维地应力基础上,通过理论分析得到了表征巷道断面应力分布的应力椭圆表达式,利用数值模拟方法研究了不同巷道布置情况下围岩变形破裂特征,并建立其与应力椭圆间的对应关系,为巷道布置方式选择提供理论依据.

1 基于应力椭圆的巷道布置设计

巷道所在位置 3 个主应力分别为 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, 倾角和方位角分别为 α_i, β_i ($i=1, 2, 3$). 大地坐标系为 $o-xyz$ (x 指向东, y 指向北, z 为铅垂向, 向上为正), 由于煤矿巷道大多选择在水平面布置, 因此假设巷道轴线倾角为 0° , 走向方位角为 γ . 建立巷道局部坐标系 $o'-x'y'z'$, 其中 $o'y'$ 为巷道轴向, $o'z'$ 为铅垂方向, $o'x'$ 在水平面内并与巷道轴向垂直, 如图 1 所示.

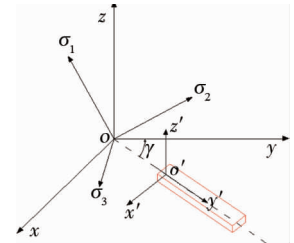


图 1 三维应力场与巷道布置

设 3 个主应力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 在巷道坐标系 $o'-x'y'z'$ 中的方向余弦分别为 l_i, m_i, n_i ($i=1, 2, 3$), 则

$$\begin{cases} l_1 = \cos\alpha_1 \sin(\beta_1 - \gamma); \\ m_1 = \cos\alpha_1 \cos(\beta_1 - \gamma); \\ n_1 = \sin\alpha_1; \\ l_2 = \cos\alpha_2 \sin(\beta_2 - \gamma); \\ m_2 = \cos\alpha_2 \cos(\beta_2 - \gamma); \\ n_2 = \sin\alpha_2; \\ l_3 = \cos\alpha_3 \sin(\beta_3 - \gamma); \\ m_3 = \cos\alpha_3 \cos(\beta_3 - \gamma); \\ n_3 = \sin\alpha_3. \end{cases} \quad (1)$$

由坐标变换求出 $o'-x'y'z'$ 坐标系中应力张量

$$\begin{pmatrix} \sigma_{x'} & \tau_{x'y'} & \tau_{x'z'} \\ \tau_{x'y'} & \sigma_{y'} & \tau_{y'z'} \\ \tau_{x'z'} & \tau_{y'z'} & \sigma_{z'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \sigma_1 & & \\ & \sigma_2 & \\ & & \sigma_3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

根据弹性力学可知,无限长巷道可以看作平面应变问题,忽略巷道轴向影响,受力简化为

$$\begin{aligned} \sigma_{x'} &= \sigma_1 l_1^2 + \sigma_2 l_2^2 + \sigma_3 l_3^2; \\ \sigma_{y'} &= \sigma_1 n_1^2 + \sigma_2 n_2^2 + \sigma_3 n_3^2; \\ \tau_{x'z'} &= \sigma_1 l_1 n_1 + \sigma_2 l_2 n_2 + \sigma_3 l_3 n_3. \end{aligned} \quad (3)$$

则巷道断面($x'o'z'$ 剖面)内主应力分别为

$$\begin{cases} \sigma_1' = \frac{\sigma_{x'} + \sigma_{z'}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{x'} - \sigma_{z'}}{2}\right)^2 + \tau_{x'z'}^2}; \\ \sigma_2' = \frac{\sigma_{x'} + \sigma_{z'}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{x'} - \sigma_{z'}}{2}\right)^2 + \tau_{x'z'}^2}. \end{cases} \quad (4)$$

取 $o' - x'z'$ 的两个轴与应力主方向重合,则巷道断面任意斜截面上应力矢量可表示为

$$\left(\frac{x'}{\sigma_1}\right)^2 + \left(\frac{y'}{\sigma_2}\right)^2 = l'^2 + m'^2 = 1. \quad (5)$$

式(5)即为巷道断面上的应力椭圆.

从地应力的角度考虑巷道布置时,应使巷道断面受力最小,即应力椭圆最小,这里取巷道断面主应力和($\sigma_1' + \sigma_2'$)最小.根据式(1)~式(4)计算得到最优巷道走向方位角为

$$\gamma = 90^\circ + \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{A_1 \sin 2\beta_1 + A_2 \sin 2\beta_2 + A_3 \sin 2\beta_3}{A_1 \cos 2\beta_1 + A_2 \cos 2\beta_2 + A_3 \cos 2\beta_3}\right). \quad (6)$$

式中: $A_1 = \sigma_1 \cos^2 \alpha_1$; $A_2 = \sigma_2 \cos^2 \alpha_2$; $A_3 = \sigma_3 \cos^2 \alpha_3$.

2 数值模拟分析

2.1 模型建立

以平顶山四矿戊九新专回为工程背景建立数值计算模型.巷道断面简化为圆形,半径 2 m,巷道围岩以泥岩为主,力学参数:弹性模量 $E=7$ GPa,黏聚力 $C=3.5$ MPa,内摩擦角 $\varphi=30^\circ$,泊松比 $\mu=0.28$,抗拉强度 $\sigma_t=0.8$ MPa.采用位移约束边界条件,各面 3 个方向位移均固定,本构模型为莫尔-库仑模型.

模拟方案:巷道为水平布置,轴向方位角在 $0^\circ \sim 180^\circ$,每 30° 取一个值,共建立 6 个数值模型,每个模型初始应力根据巷道走向及实测地应力结果(见表 1),按式(2)计算而得.

表 1 平顶山四矿原岩应力

埋深/m	主应力	实测值/MPa	方位角/($^\circ$)	倾角/($^\circ$)
740	σ_1	22.99	241.21	-16.78
	σ_2	19.10	352.75	-50.61
	σ_3	12.81	139.29	-34.41

2.2 巷道围岩应力分布

开挖前巷道断面上应力大小及分布形态是影响巷道稳定性的关键,应力椭圆是巷道受力状态的综合体现,根据式(4)和式(5)计算并绘制了不同走向巷道断面的应力椭圆,如图 2 所示.由图可知,随着巷道走向 γ 的增加,应力椭圆先变小再增大, $\gamma=60^\circ$ 时应力椭圆最小.

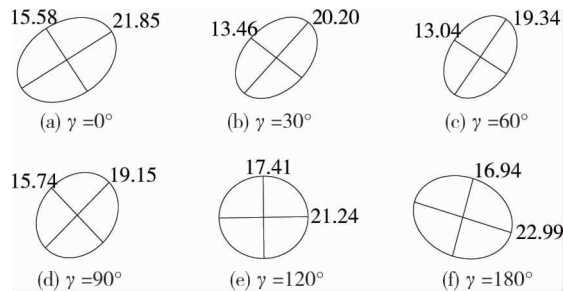


图 2 不同走向巷道断面应力椭圆(单位:MPa)

巷道开挖以后,围岩应力状态被破坏,导致巷道一定范围内径向应力降低,应力向巷道切向转移,引起应力集中^[8].开挖稳定后围岩最大主应力分布如图 3 所示,对比分析图 2 和图 3 可知,围岩二次应力分布

特征与应力椭圆的形态有明显关联性,应力集中区主要分布在断面最小主应力 σ_2' 方向上,且断面最大主应力 σ_1' 越大,应力集中程度越明显,对巷道围岩稳定也越不利.

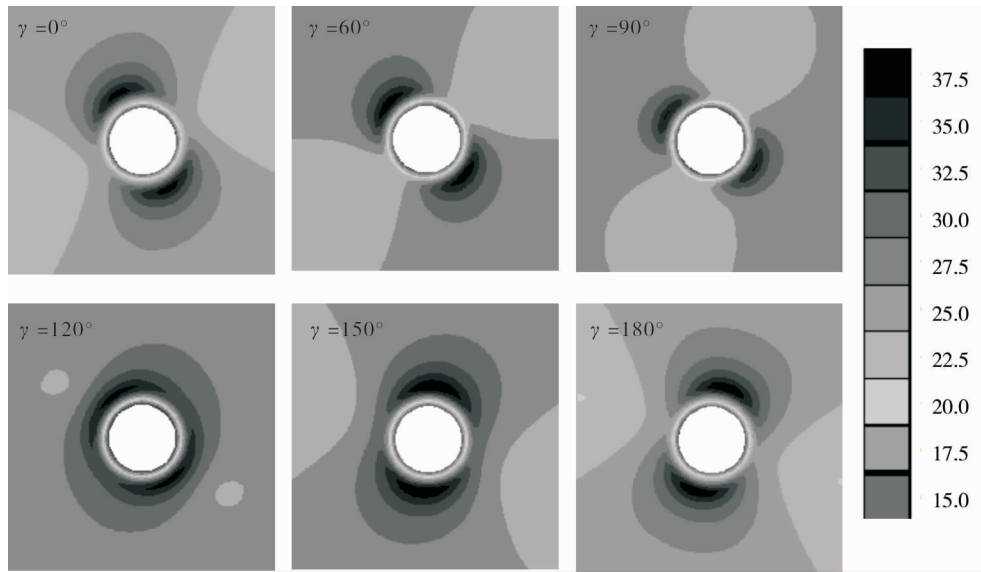


图 3 不同走向围岩最大主应力分布

2.3 原岩应力对巷道稳定性影响分析

由于本次试验主要是研究原岩应力分布对巷道围岩变形破裂的影响规律,因此取每个模型的巷道表面最大变形量和塑性区面积作为评价指标^[9],试验结果见表 2.

表 2 数值模拟试验结果

模型	巷道走向/(°)	破坏范围/m ²	最大变形量/mm
1	0	13.51	115
2	30	12.47	102
3	60	11.39	96
4	90	13.14	108
5	120	13.65	119
6	150	13.66	121

为了直观地分析原岩应力对巷道围岩稳定性的影响,分别作巷道断面主应力和($\sigma_1' + \sigma_2'$)与围岩破坏范围和变形的关系曲线,如图 4 和图 5 所示.

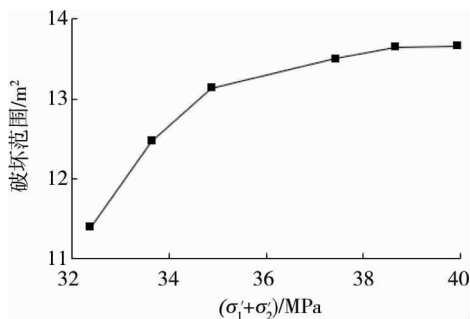


图 4 原岩应力与巷道破坏的关系

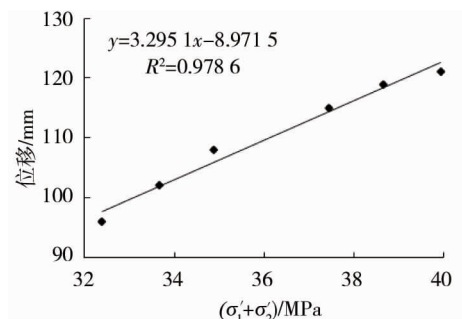


图 5 原岩应力与巷道变形的关系

由图 4 和图 5 可知:(1)随着巷道断面主应力和的增大,巷道破坏范围先迅速增加后趋于平缓.主应力和由 32.4 MPa 增加到 37.4 MPa,巷道破坏范围提高了约 20%,主应力和继续增加,巷道破坏范围增加不再明显,存在一个临界值;(2)随着巷道断面主应力和的增大,巷道表面变形近似呈线性增加,主应力和由 32.4 MPa 增加到 40.0 MPa,巷道表面变形量提高了 26%.

2.4 原岩应力对巷道破坏特征影响分析

不同应力椭圆下巷道破坏特征如图6所示,由图6可知,随着巷道走向的改变,巷道主要破坏区域也随之发生改变,主要分布在垂直于最大主应力方向上;应力椭圆形状对巷道破坏区域分布形态也存在一定影响,应力椭圆离心率越小,即围岩受力越均匀,则巷道破坏区域分布也越均匀。

巷道开挖卸荷引起的应力集中是导致围岩破裂的决定因素,根据莫尔-库仑准则,岩体破裂需要满足下列条件^[8]:

$$f_s = \sigma_1 - \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \sigma_3 - \frac{2C\cos\varphi}{1 - \sin\varphi} > 0. \quad (7)$$

式中: C 为岩体的黏聚力; φ 为内摩擦角。

式(7)表明,岩体破裂主要由主应力差值决定.巷道开挖使得切向应力增加,径向应力降低,产生巨大的应力差,必然导致一定范围内岩体破裂.特别是在垂直于最大主应力方向上,由于初始切向应力较大,应力集中更明显(见图3),容易发生片帮、岩爆等破坏特征。

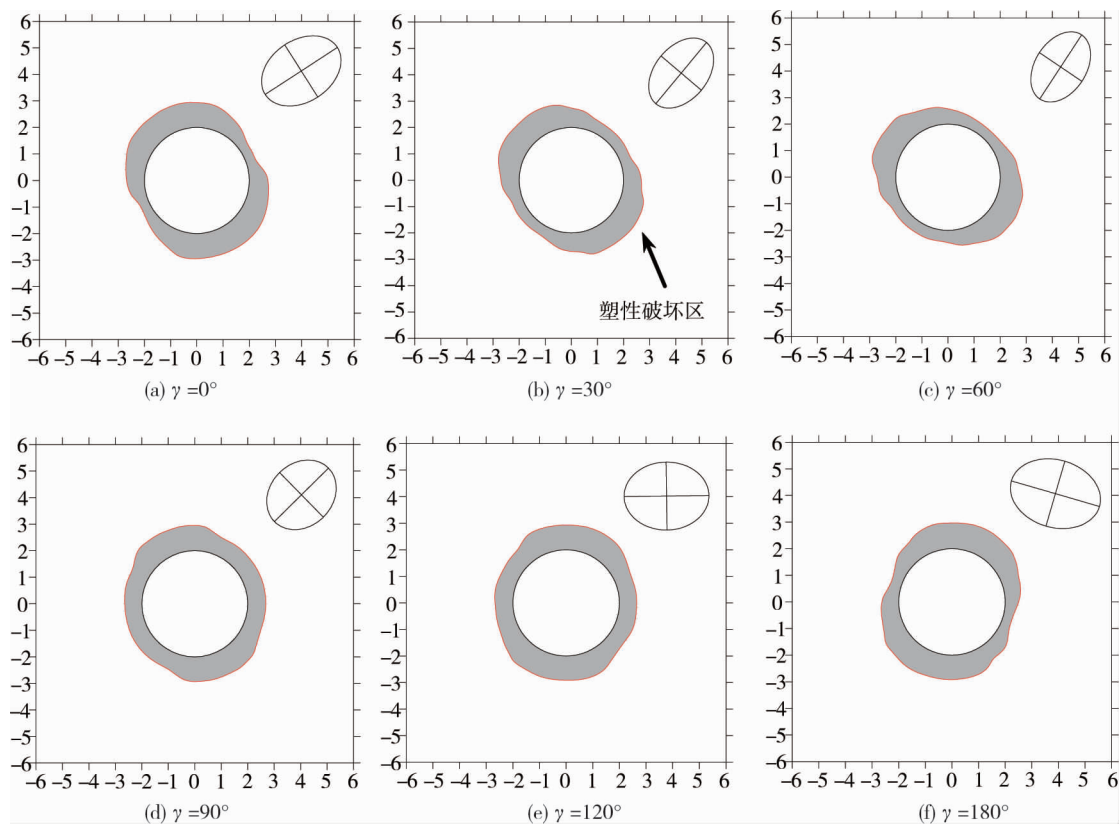


图6 应力椭圆与巷道围岩破坏特征关系

3 工程实践

为了进一步验证巷道断面上应力椭圆对其布置影响规律,在平煤十二矿一四一机巷布置测点(图7),测点埋深1100m,采用空心包体应力解除法对地应力进行实测,结果见表3,属于典型的以构造应力为主的深埋高地应力巷道^[10],应力场特征对巷道围岩稳定影响显著。

表3 平顶山十二矿原岩应力

埋深/m	主应力	实测值/MPa	方位角/(°)	倾角/(°)
1100	σ_1	43.56	246.44	16.32
	σ_2	25.13	310.02	-57.20
	σ_3	20.81	165.24	-27.59

根据式(4)和式(5)计算得到各条巷道横剖面的应力椭圆,如图7所示,两条上山巷道应力椭圆最大,处于不利的布置方式.一四零皮带上山为半圆拱形,采用锚网喷支护,由于受力状况差,掘进期间巷道变形破坏严重,破坏主要发生在顶底板,其中顶板下沉量超过400 mm,底臃量超过500 mm,两帮收敛量也达到400 mm,松动圈实测表明顶板松动圈在2.0~2.2 m,底板松动圈在1.9~2.2 m,两帮松动圈较小为1.6~1.8 m,由于巷道破坏严重,不得不对部分地段进行36U钢加强支护.

相反,与一四零皮带上山相连的总回风巷,其巷道断面应力椭圆较小且受力分布均匀.该巷道同样采用锚网喷支护,支护参数也基本相同,巷道掘进期间围岩变形很快就趋于稳定,而且变形量不大,实测松动圈在1.4~1.8 m.

上述实例表明,巷道布置方式对围岩稳定性有很大影响,根据原岩应力大小和分布特征,选择合理的巷道布置方式,使巷道断面应力椭圆最小,将有利于巷道围岩稳定,降低巷道支护成本.

4 结论

1) 巷道围岩受力状态可由其断面应力椭圆来表征,不同的巷道布置下其受力状态有显著差异,最优的巷道布置方式应使巷道断面上应力椭圆最小.

2) 应力椭圆大小是影响巷道围岩稳定的关键因素,随着巷道断面主应力和的增加,巷道围岩破坏范围先迅速增加后趋于平缓,存在一个临界值,而巷道表面变形近似呈线性增加.

3) 巷道围岩破坏特征随着应力椭圆的不同而发生改变,垂直最大主应力方向上由于应力集中程度最高,破坏范围更大,是需要重点加强支护的区域;巷道断面上应力分布形态也会影响围岩破坏特征,应力分布越均匀,巷道破坏区域分布也越均匀.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张延新,蔡美峰,欧阳振华.地应力与巷道布置关系的理论研究[J].岩土工程技术,2005,19(2):93-97.
- [3] 鲁岩,邹喜正,刘长友,等.构造应力场中的巷道布置[J].采矿与安全工程学报,2008,25(2):144-149.
- [4] 孙玉福.水平应力对巷道围岩稳定性的影响[J].煤炭学报,2010,35(6):891-896.
- [5] 勾攀峰,韦四江,张盛.不同水平应力对巷道稳定性的模拟研究[J].采矿与安全工程学报,2010,27(2):143-148.
- [6] 张明建,镐振,郜进海,等.不同水平应力作用下巷道围岩破坏特征研究[J].煤炭科学技术,2014,42(3):4-7.
- [7] 张宜虎,卢轶然,周火明,等.围岩破坏特征与地应力方向关系研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(2):3526-3535.
- [8] 杨旭旭,靖洪文,陈坤福,等.深部原岩应力对巷道围岩破裂范围的影响规律研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(4):495-500.
- [9] 刘畅,李宇星,覃敏.基于三维地应力实测的巷道稳定性优化研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(5):1372-1380.
- [10] 康红普.煤矿井下应力场类型及相互作用分析[J].煤炭学报,2008,33(12):1329-1335.

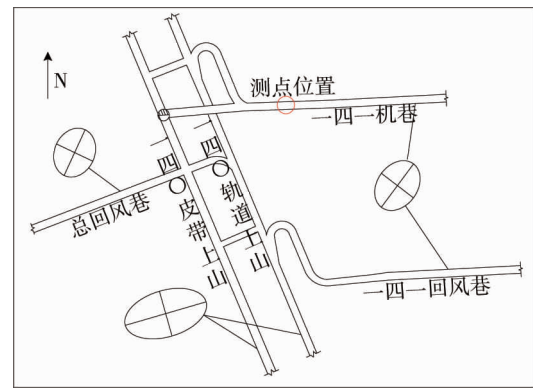


图7 巷道布置与应力椭圆的关系