

文章编号: 1673-3363-(2015)03-0504-07

主应力对深部软岩巷道围岩稳定性影响规律研究

赵维生¹, 韩立军¹, 张益东², 赵周能³, 王桂峰²

(1. 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;

2. 中国矿业大学矿业工程学院, 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;

3. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621000)

摘要 以某矿为工程背景, 根据深部软岩巷道可能存在的地应力场类型和巷道轴向角度 α (轴向与最大水平主应力的夹角), 设计出105组数值模拟方案, 研究了深部软岩巷道围岩稳定性随轴向、径向侧压系数(λ_y , λ_x)及巷道轴向角度(α)变化的规律, 研究了侧压系数因子 N_{λ_n} 和轴向角度因子 N_α 对巷道围岩稳定性的影响权重。研究表明: 深部软岩巷道布置的合理轴向角度(α)并非只沿最大水平主应力方向布置时才最有利于巷道的稳定, 而与巷道所处的具体地应力场有关; 当巷道轴向与水平主应力方向不平行时, 可将更靠近巷道轴向的水平主应力视为轴向应力, 将另外一个水平主应力视为径向应力。

关键词 主应力; 巷道布置; 影响因子; 深部软岩巷道; 围岩稳定性

中图分类号 TD 322 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2015.03.025

Study on the influence of principal stress on the stability of surrounding rock in deep soft rock roadway

ZHAO Weisheng¹, HAN Lijun¹, ZHANG Yidong², ZHAO Zhouneng³, WANG Guifeng²

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. School of Mines, State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3. School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621000, China)

Abstract Taking some mine as the engineering background, the 105 groups of numerical simulation project have been designed according to the possible existence of ground stress type of deep soft rock roadway and to the angle α which represents the numerical value between roadway axis and the direction of maximum horizontal principal stress. The law of the stability of surrounding rock of deep soft rock tunnel excavation, changing along the coefficient of axial and radial lateral pressure coefficient (λ_y , λ_x) and the angle of the roadway axial (α), has been studied. Besides, both the weight of N_{λ_n} that stands for the factor of lateral pressure coefficient and N_α that represents the factor of axial angle in complex stress field have been studied. The results have shown that the suitable axial angle for the layout of roadway is related to the type of stress field, and that not only laying along the maximum horizontal principal stress is the most conducive to the stability of roadway surrounding rock; When the axis of roadway in deep rock does not parallel with the direction of horizontal principal stress, the horizontal

收稿日期: 2014-02-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174196, 51204168, 51109209); 高等学校博士学科点专项科研基金新教师类课题项目(20120095120019)

作者简介: 赵维生(1987—), 男, 四川省内江市人, 博士研究生, 从事矿山压力及围岩控制方面的研究。

E-mail: zhaoweisen1987@qq.com

Tel: 13407536071

principal stress (be it the maximum or the minimum) that is closer to the axis of roadway could be re-garded as the axial stress, while the other horizontal principal stress could be taken as the radial stress.

Key words principal stress; roadway layout; impact factor; deep soft rock roadways; the stability of surrounding rock

地应力是引起采矿及其他各种地下岩土开挖工程变形和破坏的根本作用力^[1]。构造等因素使得深部地应力较为复杂，具体表现为最大主应力方向的差异和两水平侧压系数的复杂化^[2]，依靠传统的经验来设计巷道布置及支护方式已经不能满足生产需求。因此，复杂地应力场中深部软岩巷道围岩稳定性规律是学者研究的热点^[3-4]。研究者通过声波测试和空心包体法^[5]、理论分析和数值模拟^[6-7]、实测地应力大小和方向^[8-9]等手段研究了地应力场对巷道围岩稳定性的影响，并提出相应的预测和控制方法。然而，对于复杂地应力环境下的深埋软岩巷道围岩稳定性规律研究鲜见报道。

本文尽可能地考虑了深部地应力场中两水平侧压系数的所有情况，在综合考虑各种分析方法对不同轴向角度的非圆形巷道位于非等压空间应力场的可行性后，选择数值模拟方法分别分析了 σ_v 型应力场、 σ_{hv} 型应力场、 σ_h 型应力场中不同水平侧压系数 λ_y, λ_x 情况下的围岩变形规律，以确定相应构造应力下适合巷道轴向布置的角度范围，对保障深埋软岩巷道的围岩稳定有极其重要的意义。

1 深部软岩巷道围岩应力场环境

某矿井底车场布置在砂质泥岩中(岩石力学参数详见表 1)，井底车场平均埋深约 1 000 m，由于地质构造复杂，在井底车场大断面硐室及主要巷道掘进期间围岩在短期内的变形量大，且锚杆(索)均发生拉剪破坏。

表 1 岩石力学参数
Table 1 Mechanical parameters

岩性	体积模量/ GPa	切变模量/ GPa	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ MPa	抗拉强度/ MPa
页岩	3.30	1.54	32	2.28	3.55
砂质泥岩	1.43	0.45	30	3.07	0.15
砂岩	1.83	0.846	36	8.81	4.22

受构造等影响，深部软岩巷道围岩水平主应力 $\sigma_y(\sigma_{hmax})$ ， $\sigma_x(\sigma_{hmin})$ 分别与侧压系数 $\lambda_y(\lambda_{max})$ ， $\lambda_x(\lambda_{min})$ 有关^[10]，且二者往往不相等，其中 $\lambda_y(\lambda_{max})$ ， $\lambda_x(\lambda_{min})$ 分别表示 $\sigma_y(\sigma_{hmax})$ ， $\sigma_x(\sigma_{hmin})$ 与 σ_z 的比值。侧压系数的大小与所处应力环境及巷道的具体位置有关，

如：当深部软岩巷道布置在背斜范围内时，侧压系数通常大于等于 1；当深部软岩巷道布置在向斜时，侧压系数往往小于等于 1。令巷道轴向与最大水平主应力 σ_{hmax} 的夹角为 α ，如图 1。在实际地质环境中，两水平侧压系数 λ_y, λ_x 往往不等，将深部软岩巷道围岩所处的应力场分为如下 3 类^[11]： σ_v 型应力场，即 $\sigma_v \geq \sigma_{hmax} \geq \sigma_{hmin}$ ； σ_{hv} 型应力场，即 $\sigma_{hmax} > \sigma_v \geq \sigma_{hmin}$ ； σ_h 型应力场，即 $\sigma_{hmax} \geq \sigma_{hmin} > \sigma_v$ 。

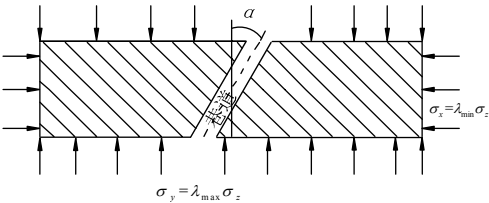


图 1 巷道轴向布置示意图
Fig.1 Axial arrangement diagram of roadway

2 分析方案及约定

2.1 分析模型

建立 5 组数值模型，模型巷道与最大水平主应力的夹角分别为 0°，30°，45°，60°，90°。数值模型如图 2，模型尺寸长×宽×高为 20 m×80 m×30 m，巷道断面为直墙拱形断面，宽 4.8 m、墙高 1.8 m、拱高 1.7 m，模型力学参数见表 1，巷道埋深取 1 000 m、围岩密度取 22 kg/m³，则垂直应力为 22 MPa。

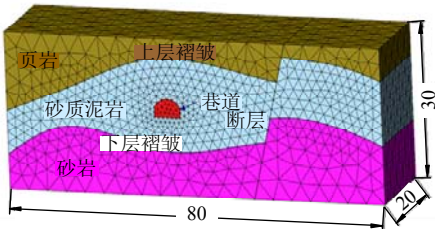


图 2 数值模型 (m)
Fig.2 Numerical model

2.2 分析方案

为研究深部软岩巷道在 3 种不同应力场中轴向应力和径向应力对不同 α 角围岩变形的影响，根据侧压系数 $\lambda_{max}, \lambda_{min}$ ，将 3 种应力场分别分为 6，9，6 组子应力场进行分析，详见表 2~4。

表 2 σ_v 型子应力场
Table 2 Sigma v-shaped stress field

应力场编号	$\lambda_{\max}(\sigma_2/\text{MPa})$	$\lambda_{\min}(\sigma_3/\text{MPa})$
σ_{v1}	0.5(11)	0.5(11)
σ_{v2}	0.8(17.6)	0.5(11)
σ_{v3}		0.8(17.6)
σ_{v4}		0.5(11)
σ_{v5}	1(22)	0.8(17.6)
σ_{v6}		1(22)

表 3 σ_{hv} 型子应力场
Table 3 Sigma hv-shaped stress field

应力场编号	$\lambda_{\max}(\sigma_1/\text{MPa})$	$\lambda_{\min}(\sigma_3/\text{MPa})$
σ_{hv1}	1.2(26.4)	0.5(11)
σ_{hv2}		0.8(17.6)
σ_{hv3}		1(22)
σ_{hv4}		0.5(11)
σ_{hv5}	1.5(33)	0.8(17.6)
σ_{hv6}		1(22)
σ_{hv7}		0.5(11)
σ_{hv8}	1.8(39.6)	0.8(17.6)
σ_{hv9}		1(22)

表 4 σ_h 型子应力场
Table 4 Sigma h-shaped stress field

应力场编号	$\lambda_{\max}(\sigma_1/\text{MPa})$	$\lambda_{\min}(\sigma_2/\text{MPa})$
σ_{h1}	1.2(26.4)	1.2(26.4)
σ_{h2}	1.5(33)	1.2(26.4)
σ_{h3}		1.5(33)
σ_{h4}		1.2(26.4)
σ_{h5}	1.8(39.6)	1.5(33)
σ_{h6}		1.8(39.6)

2.3 分析约定

1) 做如下“非正交轴向应力简化假设”，并在分析数据时对其进行论证：当 $\alpha \leq 45^\circ$ 时，将最大水平主应力 σ_y 视为巷道的轴向应力，将最小水平主应力 σ_x 视为巷道的径向应力；当 $45^\circ < \alpha < 90^\circ$ 时，将最大水平主应力 σ_y 视为巷道的径向应力，将最小水平主应力 σ_x 视为巷道的轴向应力。

2) 令 N_α 为子应力场中围岩变形曲线随 α 角变化的影响因子，并令 $\alpha=0^\circ$ 时， $N_\alpha=1$ ， α 取其他角度时 N_α 等于该角度时围岩最大变形量 S_α 除以 α 等于 0° 时的最大围岩变形量 S_0 。将 $N_\alpha > 1.5$ 时的角度 α 称为危险角度。令 $N_{\lambda n}$ 为 α 取相同角度时围岩变形曲线随子应力场变化的侧压系数影响因子，并令 σ_{v1} 、 σ_{hv1} 、 σ_{h1} 子应力场 $N_{\lambda 1}=1$ ，同类型其他子应力场 $N_{\lambda n}$ 为该状态下围岩最大围岩变形量 $S_{\lambda n}$ 除以 $N_{\lambda 1}=1$ 时的最大围岩变形量 $S_{\lambda 1}$ ，即：

$$N_\alpha = S_\alpha / S_0, N_{\lambda n} = S_{\lambda n} / S_{\lambda 1} \tag{1}$$

当影响因子大于 1 时，围岩最大变形量增大；相反，当影响因子小于 1 时，围岩最大变形量减小，有利于巷道稳定。

为权衡双因子对围岩稳定性影响的比重，令 Q_α 为角度 α 的权重比， $Q_\alpha = N_\alpha / (N_{\lambda n} + N_\alpha)$ 。当 $Q_\alpha > 0.5$ 时，角度 α 对围岩稳定性的影响程度大于应力场，并且随着 Q_α 增加，角度 α 对围岩稳定性的影响较侧压系数更剧烈；当 $Q_\alpha < 0.5$ 时，侧压系数 λ 对围岩稳定性的影响程度大于角度 α 。

3 σ_v 型应力场围岩稳定性

3.1 围岩变形规律

在 σ_v 型应力场中，最大主应力 σ_1 为垂直应力 σ_z ，中间主应力 σ_2 为最大水平主应力 σ_y ，最小主应力 σ_3 为最小水平主应力 σ_x 。对 σ_v 型应力场中 30 组数值分析结果进行遍历，得到各子应力场中围岩变形的角度-位移关系如图 3 所示，各 α 角巷道在不同子应力场中的应力场-位移关系如图 4 所示。

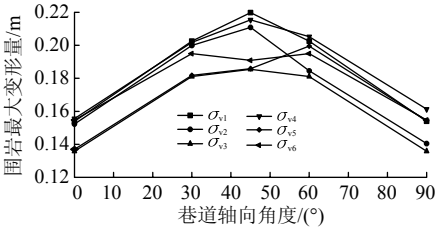


图 3 角度-位移(σ_v 型应力场)

Fig.3 Angle-displacement (sigma v-shaped stress field)

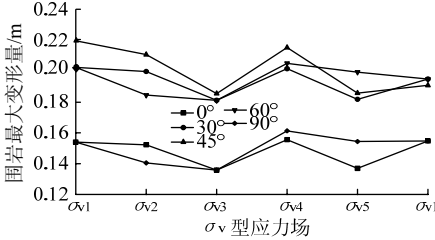


图 4 子应力场-位移(σ_v 型应力场)

Fig.4 Sub-stress field-displacement (sigma v-shaped stress field)

1) 由图 3 知：在各 σ_v 型子应力场中，巷道围岩稳定性沿角度 α 等于 45° 呈近似对称，当 α 在 45° 附近取值时围岩变形取得最大值；在 α 取 0° 和 90° 时，巷道围岩最大变形量相近，且取得最小值。另外，在相同子应力场中，不同角度的围岩最大变形值与最小变形值的比值范围为 1.26~1.50，平均值为 1.38。上述分析表明：在 σ_v 型应力场中布置巷道时，将巷道布置在轴向沿水平主应力的方向最有利于巷道围岩的稳定，将巷道布置在两水平主应力的角平分线(α 等于 45°)上最不利于巷道的稳定。

2) 对比图 4 中的围岩变形趋势线不难发现, 当 α 在 $0^\circ\sim 45^\circ$ 或 $45^\circ\sim 90^\circ$ 范围内取值时, 围岩变形规律均随侧压系数(λ_{\max} , λ_{\min})的变化一致; 在 $0^\circ\sim 45^\circ$ 范围内取值与 $45^\circ\sim 90^\circ$ 范围内取值的围岩变形规律略有不同, 具体体现为当 α 在 $0^\circ\sim 45^\circ$ 之间取值时, 巷道的最大围岩变形量在 σ_{v1} , σ_{v2} , σ_{v4} 这 3 个子应力场中的值非常接近, 而当 α 在 $45^\circ\sim 90^\circ$ 之间取值时, 巷道的最大围岩变形量在 σ_{v1} , σ_{v2} , σ_{v4} 这 3 个子应力场中的值差别较大。这是由于在 $0^\circ\sim 45^\circ$ 范围内取值时, 围岩轴向应力为最大水平主应力 σ_y , 径向应力为最小水平主应力 σ_x ; 在 $45^\circ\sim 90^\circ$ 范围内取值时, 围岩轴向应力为最小水平主应力 σ_x , 径向应力为最大水平主应力 σ_y 。

3) 分别对比图 4 中 α 取 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 在 $\sigma_{v1}, \sigma_{v2}, \sigma_{v4}$ 子应力场条件的围岩变形知, 当 α 取这 3 个角度时, 巷道受到轴向应力 σ_y 的影响较小, 围岩最大变形量基本保持一致; 由 σ_{v2} 变到 σ_{v3} 、 σ_{v4} 变到 σ_{v5} 的变化可知, σ_y 不变时, 围岩变形量在径向侧压系数 λ_x 等于 0.8 时取得最小值。当 α 取 60° 和 90° 时, 最小水平主应力 σ_x 为巷道轴向应力, 最大水平主应力 σ_y 为巷道径向应力, 对比 σ_{v4} , σ_{v5} , σ_{v6} 知, 随着轴向应力增加, 围岩变形量稍微减小, 但减小幅度不足最大值的 5%。以上分析表明: 在 σ_v 型应力场中, 巷道轴向角度 α 小于等于 45° 时, 最大水平主应力 σ_y 可视为轴向应力, 轴向应力 σ_y 对巷道围岩稳定性的影响可忽略, 验证了“非正交轴向应力简化假设”。

3.2 围岩稳定因子权重

σ_v 型应力场中的围岩稳定性影响因子 N_α 和 $N_{\lambda n}$ 分别见表 5, 6, 其中角度因子 N_α 在双因子中的权重 Q_α 见表 7。

表 5 角度因子 N_α (σ_v 型应力场)

Table 5 Factor of angle N_α (sigma v-shaped stress field)

$\alpha/(^\circ)$	σ_{v1}	σ_{v2}	σ_{v3}	σ_{v4}	σ_{v5}	σ_{v6}
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
30	1.31	1.31	1.33	1.29	1.32	1.26
45	1.42	1.38	1.36	1.38	1.35	1.23
60	1.31	1.21	1.33	1.31	1.45	1.26
90	1.00	0.92	1.00	1.03	1.12	1.00

由表 5~7 知: 在 σ_v 型应力场中, 角度因子 N_α 普遍大于 1, 且在 $\alpha=60^\circ$ 时取最大值 1.45; 侧压系数因子 $N_{\lambda n}$ 往往小于 1, 最大值仅为 1.04; 由权重 Q_α 知, 角度因子 N_α 对 σ_v 型应力场中围岩稳定性的影响总体上大于侧压系数因子 $N_{\lambda n}$ 。在 σ_v 型应力场中, 由于 N_α 恒小于 1.5, 故可认为 α 不存在危险角度范

围, 即: 在这类应力场中布置巷道时, 改变轴向角度对巷道围岩稳定性的影响不是很大; 在 $\alpha=0^\circ$ 或 $\alpha=90^\circ$ 时, 巷道围岩最趋于稳定。

表 6 侧压系数因子 $N_{\lambda n}$ (σ_v 型应力场)

Table 6 Factor of lateral pressure coefficient $N_{\lambda n}$ (sigma v-shaped stress field)

$\alpha/(^\circ)$	σ_{v1}	σ_{v2}	σ_{v3}	σ_{v4}	σ_{v5}	σ_{v6}
0	1.00	0.98	0.88	1.01	0.89	1.00
30	1.00	0.98	0.89	0.99	0.89	0.96
45	1.00	0.95	0.84	0.98	0.84	0.86
60	1.00	0.91	0.89	1.01	0.98	0.96
90	1.00	0.91	0.88	1.04	1.00	1.00

表 7 角度因子权重 Q_α (σ_v 型应力场)

Table 7 Weight of angle factor Q_α (sigma v-shaped stress field)

$\alpha/(^\circ)$	σ_{v1}	σ_{v2}	σ_{v3}	σ_{v4}	σ_{v5}	σ_{v6}
0	0.50	0.50	0.53	0.49	0.52	0.49
30	0.56	0.57	0.59	0.56	0.59	0.56
45	0.58	0.59	0.61	0.58	0.61	0.58
60	0.56	0.57	0.59	0.56	0.59	0.56
90	0.50	0.50	0.53	0.49	0.52	0.49

4 σ_{hv} 型应力场围岩稳定性

4.1 围岩变形规律

在 σ_{hv} 型应力场中, 最大主应力 σ_1 为最大水平主应力 σ_y , 中间主应力 σ_2 为垂直应力 σ_z , 最小主应力 σ_3 为最小水平主应力。对 σ_{hv} 型应力场中 45 组数值分析结果进行遍历, 围岩变形的角度-位移关系及子应力场-位移关系分别如图 5, 6 所示。

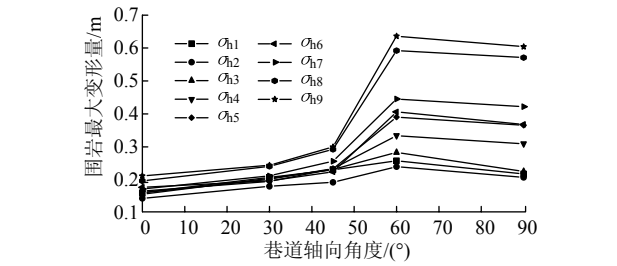


图 5 角度-位移 (σ_{hv} 型应力场)
Fig.5 Angle-displacement (sigma hv-shaped stress field)

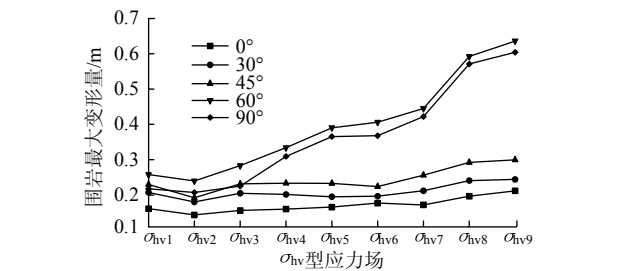


图 6 子应力场-位移 (σ_{hv} 型应力场)
Fig.6 Sub-stress field-displacement (sigma hv-shaped stress field)

1) 由图 5 知: 在 σ_{hv} 型应力场中, 当 α 在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 范围内取值时, 巷道的最大围岩变形随着 α 的增大缓慢增加, 在 $30^\circ \sim 45^\circ$ 区间各子应力场围岩最大变形增加的倍数为 1.06~1.22, 平均值为 1.16; 当 α 超过 45° 后, 各子应力状态下的围岩最大变形量在 α 达到 60° 附近时取得最大值, 此区间的围岩变形斜率随着侧压系数 λ_{\max} , λ_{\min} 的变大而剧烈增加, 在 $45^\circ \sim 60^\circ$ 区间各子应力场围岩最大变形增加的倍数为 1.12~2.12, 平均值为 1.60; 随着巷道轴向角度 α 继续增加, 围岩最大变形量略有降低。以上分析表明: 在 σ_{hv} 型应力场中布置巷道时(特别是当 λ_{\max} 较大时), 应尽量将巷道布置在轴向角度 α 小于等于 45° 范围内, 且 α 越小巷道围岩越稳定。

2) 对比图 6 中 α 取 0° , 30° , 45° 的巷道围岩最大变形曲线知, 改变两水平侧压系数 λ_{\max} , λ_{\min} 对围岩最大变形量的影响较小, 平均增加的斜率为 1.26; 对比 α 取 60° 和 90° 的围岩稳定性曲线知, 当 $\alpha > 45^\circ$ 时, 最大水平主应力 σ_y 变为径向应力, 而 σ_x 变为轴向应力时, 两水平侧压系数对围岩最大变形影响均很大, α 取 90° 时围岩变形量随侧压系数平均增加斜率为 2.93, 远高于 $0^\circ \sim 45^\circ$ 的平均增加斜率。同样说明: 在 σ_{hv} 型应力场中, 巷道轴向角度 α 小于等于 45° 时, 改变轴向应力对围岩变形有影响, 但影响很小, 最大水平主应力 σ_y 仍可视作轴向应力, 表明“非正交轴向应力简化假设”仍是合理的。

3) 由图 6 知, 当 α 在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 范围内取值, 即 σ_y 为轴向应力时, 围岩最大变形值的影响随 λ_{\max} 增大缓慢增加; 当 $\lambda_{\max}=1.2$ 时, 最大围岩变形量随着轴向侧压系数 λ_{\min} 的增加均经历先减小后增加的过程; $\lambda_{\max}=1.5$ 时, $0^\circ \sim 45^\circ$ 各角度的围岩变形量基本不随轴向侧压系数 λ_{\min} 变化; $\lambda_{\max}=1.8$ 时, $0^\circ \sim 45^\circ$ 各角度的围岩变形量随轴向侧压系数 λ_{\min} 的增大而逐渐增加。而当 α 在 $45^\circ \sim 90^\circ$ 范围内取值, 即 σ_y 为径向应力时, λ_x , λ_y 对围岩最大变形值的影响较大, 围岩变形量随着 λ_x 增加而增加, 但增加率逐渐减小。这表明: 在 σ_{hv} 型应力场中, 最大水平主应力 σ_y 作为轴向应力时, 巷道围岩稳定性受侧压系数 λ_{\max} 和 λ_{\min} 影响均很小; 最小水平主应力 σ_x 作为轴向应力时, 巷道围岩稳定性受侧压系数影响较大。

4.2 围岩稳定因子权重

σ_{hv} 型应力场中的围岩稳定性影响因子和权重见表 8~10。在 σ_{hv} 型应力场中, 角度因子 N_α 均大于等于 1, 且在 $\alpha=60^\circ$ 时取最大值 3.01; 侧压系数因子 $N_{\lambda n}$ 的最小值为 0.83, 最大值为 2.78; 由权重 Q_α

知, 角度因子 N_α 对 σ_{hv} 型应力场中围岩稳定性的影响总体上大于侧压系数因子 $N_{\lambda n}$ 。在 σ_{hv} 型应力场中, 当 $\alpha=45^\circ$ 时, N_α 接近 1.5, 当 $\alpha=60^\circ$ 时, N_α 均大于 1.5。以上分析数据表明: 当 α 大于 45° 时为布置巷道的危险轴向角度, 即 σ_{hv} 型应力场中布置巷道时, 巷道轴向角度 α 不应大于 45° 。

表 8 角度因子 N_α (σ_{hv} 型应力场)

Table 8 Factor of angle N_α (sigma hv-shaped stress field)

$\alpha/(^\circ)$	σ_{hv1}	σ_{hv2}	σ_{hv3}	σ_{hv4}	σ_{hv5}	σ_{hv6}	σ_{hv7}	σ_{hv8}	σ_{hv9}
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
30	1.29	1.26	1.31	1.26	1.18	1.11	1.23	1.22	1.15
45	1.43	1.34	1.48	1.46	1.41	1.27	1.49	1.49	1.42
60	1.60	1.67	1.81	2.09	2.36	2.30	2.59	3.01	3.01
90	1.35	1.44	1.44	1.93	2.21	2.08	2.46	2.91	2.85

表 9 侧压系数因子 $N_{\lambda n}$ (σ_{hv} 型应力场)

Table 9 Factor of lateral pressure coefficient $N_{\lambda n}$ (sigma hv-shaped stress field)

$\alpha/(^\circ)$	σ_{hv1}	σ_{hv2}	σ_{hv3}	σ_{hv4}	σ_{hv5}	σ_{hv6}	σ_{hv7}	σ_{hv8}	σ_{hv9}
0	1.00	0.89	0.97	0.99	1.03	1.10	1.07	1.22	1.31
30	1.00	0.87	0.99	0.97	0.94	0.95	1.02	1.16	1.18
45	1.00	0.84	1.01	1.02	1.01	0.97	1.11	1.27	1.30
60	1.00	0.93	1.10	1.30	1.51	1.58	1.73	2.30	2.47
90	1.00	0.95	1.03	1.42	1.68	1.69	1.94	2.62	2.78

表 10 角度因子权重 Q_α (σ_{hv} 型应力场)

Table 10 Weight of angle factor Q_α (sigma hv-shaped stress field)

$\alpha/(^\circ)$	σ_{hv1}	σ_{hv2}	σ_{hv3}	σ_{hv4}	σ_{hv5}	σ_{hv6}	σ_{hv7}	σ_{hv8}	σ_{hv9}
0	0.50	0.53	0.51	0.50	0.49	0.48	0.48	0.45	0.43
30	0.56	0.59	0.57	0.56	0.56	0.54	0.55	0.51	0.49
45	0.59	0.62	0.60	0.59	0.58	0.57	0.57	0.54	0.52
60	0.62	0.64	0.62	0.62	0.61	0.59	0.60	0.57	0.55
90	0.57	0.60	0.58	0.58	0.57	0.55	0.56	0.53	0.51

5 σ_h 型应力场围岩稳定性

5.1 围岩变形规律

在 σ_h 型应力场中, 最大主应力 σ_1 为最大水平主应力 σ_y , 中间主应力 σ_2 为最小水平主应力 σ_x , 最小主应力 σ_3 为垂直应力 σ_z 。对 σ_h 型应力场中 30 组数值分析结果进行遍历, 围岩变形的角度-位移关系及应力场-位移关系分别如图 7, 8 所示。

1) 由图 7 知: 当 $\lambda_{\max}=\lambda_{\min}(\sigma_{h1}, \sigma_{h3}, \sigma_{h6})$, 且 α 角度相同时, 当 λ 由 1 增加到 1.2 后, 巷道围岩最大变形量增加 1.15~1.34 倍, 平均增加 1.27 倍; 当 λ 由 1.2 增加到 1.5 后, 围岩最大变形量增加 1.62~1.82 倍, 平均增加 1.72 倍; λ 由 1.5 增加到 1.8

后，围岩最大变形量增加 1.63~1.66 倍，平均增加 1.65 倍。这表明：随侧压系数 λ 提高，巷道围岩的最大变形量逐渐增加，越不利于巷道围岩的稳定。另外，当 $\lambda_{\max}=\lambda_{\min}(\sigma_{h1}, \sigma_{h3}, \sigma_{h6}, \sigma_{v6})$ 时，各趋势线均沿轴 $\alpha=45^\circ$ 呈近似对称变化，且当 $\alpha=30^\circ$ 和 $\alpha=60^\circ$ 时，巷道围岩最大变形量大于 α 取其他角度时，而当 $\alpha=0^\circ$ 或 $\alpha=45^\circ$ 或 $\alpha=90^\circ$ 时，巷道围岩最趋于稳定。值得注意的是：当 $\lambda_{\max}=\lambda_{\min}$ 时，由于对称性 $\alpha=0^\circ$ 和 $\alpha=90^\circ$ 的围岩变形量相同， $\alpha=30^\circ$ 和 $\alpha=60^\circ$ 的围岩变形量也相同。这表明：当 $\lambda_{\max}=\lambda_{\min}$ 时，将巷道轴向角度 α 取为 $0^\circ, 45^\circ$ 或 90° 最有利于巷道围岩稳定。

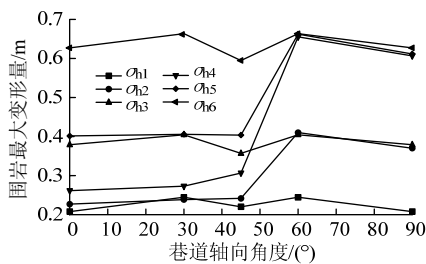


图 7 角度-位移(σ_h 型应力场)
Fig.7 Angle-displacement (sigma h-shaped stress field)

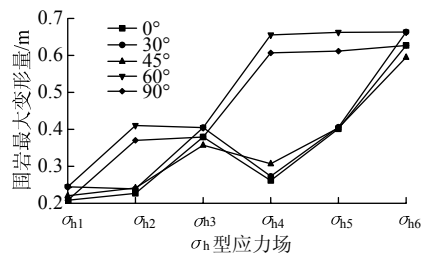


图 8 子应力场-位移(σ_h 型应力场)
Fig.8 Sub-stress field-displacement (sigma h-shaped stress field)

2) 由图 7 知：当 $\lambda_{\max}\neq\lambda_{\min}$ 时， α 在 $0^\circ\sim45^\circ$ 范围取值时，围岩变形情况均与各自 λ_{\min} 等侧压应力场的围岩变形接近；而当 α 在 $45^\circ\sim90^\circ$ 范围取值时，围岩变形情况均与各自 λ_{\max} 等侧压应力场的围岩变形接近。将 $\sigma_{h2}, \sigma_{h4}, \sigma_{h5}$ 这类“非等侧压应力场”称为“过渡型应力场”。这表明：在过渡型应力场中布置巷道，应尽量将巷道轴向布置在与最大水平主应力成 $0^\circ\sim45^\circ$ 范围内，且 α 角度越小，巷道围岩越稳定。因此，当 α 在 $0^\circ\sim45^\circ$ 范围内取值时，巷道围岩最大变形量主要受侧压系数 λ_{\min} 的影响，而侧压系数 λ_{\max} 对其影响不明显；当 α 在 $45^\circ\sim90^\circ$ 范围取值时，巷道围岩最大变形量主要受侧压系数 λ_{\max} 的影响，而侧压系数 λ_{\min} 对其影响也不明显，这亦验证了“非正交轴向应力简化假设”。

5.2 围岩稳定因子权重

σ_h 型应力场中的围岩稳定性影响因子和权重见表 11~13。

表 11 角度因子 $N_\alpha(\sigma_h$ 型应力场)

Table 11 Factor of angle N_α
(sigma h-shaped stress field)

$\alpha/(^\circ)$	σ_{h1}	σ_{h2}	σ_{h3}	σ_{h4}	σ_{h5}	σ_{h6}
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
30	1.18	1.05	1.07	1.04	1.01	1.06
45	1.06	1.06	0.94	1.17	1.01	0.95
60	1.18	1.81	1.07	2.50	1.65	1.06
90	1.00	1.63	1.00	2.32	1.52	1.00

表 12 侧压系数因子 $N_{\lambda_n}(\sigma_h$ 型应力场)

Table 12 Factor of lateral pressure coefficient N_{λ_n}
(sigma h-shaped stress field)

$\alpha/(^\circ)$	σ_{h1}	σ_{h2}	σ_{h3}	σ_{h4}	σ_{h5}	σ_{h6}
0	1.00	1.09	1.82	1.26	1.93	3.01
30	1.00	0.98	1.65	1.12	1.66	2.71
45	1.00	1.10	1.62	1.39	1.83	2.70
60	1.00	1.68	1.65	2.68	2.71	2.71
90	1.00	1.78	1.82	2.92	2.94	3.01

表 13 角度因子权重 $Q_\alpha(\sigma_h$ 型应力场)

Table 13 Weight of angle factor Q_α
(sigma h-shaped stress field)

$\alpha/(^\circ)$	σ_{h1}	σ_{h2}	σ_{h3}	σ_{h4}	σ_{h5}	σ_{h6}
0	0.50	0.48	0.35	0.44	0.34	0.25
30	0.54	0.52	0.39	0.48	0.38	0.28
45	0.51	0.49	0.37	0.46	0.35	0.26
60	0.54	0.52	0.39	0.48	0.38	0.28
90	0.50	0.48	0.35	0.44	0.34	0.25

由表 11~13 知：在 σ_h 型应力场中，角度因子 N_α 普遍大于 1，且在 $\alpha=60^\circ$ 时取最大值 2.50；侧压系数因子 N_{λ_n} 普遍大于 1，最大值为 3.01；由权重 Q_α 知，侧压系数因子 N_{λ_n} 对 σ_h 型应力场中围岩稳定性的影响总体上大于角度因子 N_α ，这表明侧压系数对巷道围岩稳定性的影响程度超过巷道轴向角度 α 。此外，在 σ_h 型非等值侧压应力场($\sigma_{v2}, \sigma_{v4}, \sigma_{v5}$)中，当 $\alpha>45^\circ$ 后， $N_\alpha>1.5$ ，说明当 $\alpha>45^\circ$ 时为巷道的危险轴向角度，这亦表明，在 σ_h 型非等值侧压应力场(过渡型应力场)中布置巷道时，巷道轴向角度 α 不应大于 45° ；而在 σ_h 型等值侧压应力场($\sigma_{v1}, \sigma_{v3}, \sigma_{v6}$)中， N_α 均小于 1.5，最大值为 1.18，说明改变轴向角度 α 对围岩变形影响较小。

6 现场工业性试验

某深埋矿井两实测水平侧压系数分别为 1.8，

1.5, 其地应力场类型对应于上述分析中的 σ_{h6} 型子应力场。分别对该矿沿不同轴向布置的 3 条开拓巷道进行围岩变形监测, 120 d 内 3 条巷道两帮及顶底板变形量如图 9。3 条开拓巷道的断面尺寸相同, 均采用锚网索喷联合支护巷道, 且支护参数相同。2 煤回风巷道、辅运巷道、主运巷道在变形监测段的巷道轴向分别与最大水平主应力方向成 5° , 41° , 71° 。

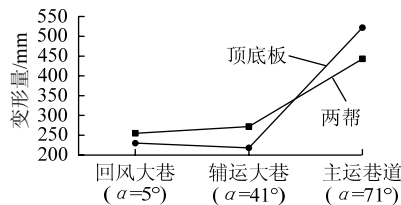


图 9 巷道围岩变形对比

Fig.9 The deformation comparison of three roadways

由图 9 知: 2 煤回风巷道和辅运巷道围岩变形量差别不大, 均远小于主运巷道围岩变形量。这说明在 σ_{h6} 型子应力场中, 当轴向角度 $\alpha < 45^\circ$ 时巷道稳定性随巷道轴向布置角度的变化不大, 而当 $\alpha > 45^\circ$ 后巷道围岩变形迅速增加, 这与数值分析结论一致。

7 结 论

1) 在 σ_v 型应力场中布置巷道, $\alpha=0^\circ$ 或 90° 时围岩最稳定, 不存在危险角度; 在 σ_{hv} 和 σ_h 型应力场中布置巷道, 若 $\lambda_{\max}=\lambda_{\min}$, 则 $\alpha=0^\circ(90^\circ)$ 或 45° 时巷道围岩最稳定, 且不存在危险角度, 若 $\lambda_{\max}\neq\lambda_{\min}$, 则 $\alpha=0^\circ$ 时巷道围岩最稳定, $\alpha\geq 45^\circ$ 为危险角度。

2) 不同类型的应力场中, 深部围岩稳定性影响因子的权重不同。在 σ_v 型和 σ_{hv} 型应力场中, 角度因子 N_α 普遍大于侧压系数因子 N_{λ_n} , α 为保障巷道围岩稳定性的首要考虑因素; 在 σ_h 型应力场中, 侧压系数因子 N_{λ_n} 往往大于角度因子 N_α , 此时 λ 对围岩稳定性的影响程度远大于 α 。

3) 当 $\alpha\leq 45^\circ$ 时, 均可将最大、最小水平主应力分别视为该巷道的轴向、径向应力; 当 $\alpha>45^\circ$ 时, 可将最大、最小水平主应力分别视为该巷道的径向、轴向应力。一般地, 巷道围岩稳定性主要受到径向应力影响; 特别地, 当 $\lambda_{\max}>1$ 且 $\alpha>45^\circ$ 时, 径向应力和轴向应力均对围岩变形产生明显影响。

参考文献:

[1] 何满潮, 谢和平. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2813.
HE Manchao, XIE Heping. Study on mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Me-

chanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.
[2] 何满潮, 孙晓明. 中国煤矿软岩巷道工程支护设计与施工指南[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 105-109.
[3] 靖洪文, 李元海, 许国安. 深埋巷道围岩稳定性分析与控制技术研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 877-880.
JING Hongwen, LI Yuanhai, XU Guo'an. Analysis of surrounding rock stability of deeply buried roadways and study on its control techniques[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6): 877-880.
[4] 柴华彬, 张彦宾, 程立朝, 等. 深部巷道交岔点围岩变形及稳定性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(2): 200-204.
CHAI Huabin, ZHANG Yanbin, CHENG Lichao, et al. Research on deformation and stability of wall rocks in intersection of laneway in deep mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(2): 200-204.
[5] 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.
YANG Xuxu, JING Hongwen, CHEN Kunfu, et al. Study on influence law of in-situ stress in deep underground rocks on the size of failure zone in roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(4): 495-500.
[6] 张百红, 韩立军, 韩贵雷, 等. 深部三维地应力实测与巷道稳定性研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2547-2555.
ZHANG Baihong, HAN Lijun, HAN Guilei, et al. Study of 3D in-situ stress measurement and stability of roadways in depth[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2547-2555.
[7] 孙玉福. 水平应力对巷道围岩稳定性的影响[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 35(6): 891-895.
SUN Yufu. Affects of in-situ horizontal stress on stability of surrounding rock roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 35(6): 891-895.
[8] 张益东, 张少华, 侯朝炯, 等. 地应力对锚杆支护的沿空巷道的影晌[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(4): 371-374.
ZHANG Yidong, ZHANG Shaohua, HOU Chaojiong, et al. Influence of crustal stress on gob-side roadway supported by rock bolt[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, 28(4): 371-374.
[9] 陈明, 卢文波, 周创兵, 等. 初始地应力对隧洞开挖爆生裂隙区的影响研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2254-2258.
CHEN Ming, LU Wenbo, ZHOU Chuangbing, et al. Influence of initial in-situ stress on blasting-induced cracking zone in tunnel excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2254-2258.
[10] 王渭明, 杨更社, 张向东, 等. 岩石力学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010: 133-135.
[11] 陈炎光, 陆士良. 中国煤矿巷道围岩控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1994: 40-43.