

# 地应力对深部回采巷道布置方向的影响分析\*

陈登红<sup>1,2,3</sup> 华心祝<sup>1,2</sup>

(1.安徽理工大学 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室,安徽 淮南,232001;2.安徽理工大学 能源与安全学院,安徽 淮南,232001;3.安徽理工大学 土木工程博士后科研流动站,安徽 淮南,2320013)

**摘要:**为分析地应力对深部回采巷道布置方向的影响,在参考相关文献和实测淮南矿区7个深部矿井20组地应力的基础上,获得高水平构造应力赋存特征。针对某深部矿井首采面两回采巷道布置方位与最大水平应力一致时,断面收缩仍然严重,对比 Tresca 理论与 Gale 理论,确定前者更适合分析此类巷道变形破坏状态。按点的应力状态计算不同侧压下巷道最优布置方位与最大水平主应力夹角 $\beta$ ,得到首采面两巷的 $\beta$ 为 $45^\circ$ 。根据巷道帮、顶应力差值越大围岩稳定性越差,进一步探究了 $\beta$ 从 $0^\circ$ 偏转为 $12^\circ$ ,其围岩变形的应力差影响程度降至91%。接替面工程实践表明:初期支护方案相同时巷道围岩变形略有改善,后期支护方案改为帮、顶角增加两根锚索外加信号柱及时补强后支护效果良好,研究结果为类似条件下巷道布置与围岩控制提供了一定参考。

**关键词:**深部回采巷道; Tresca 理论; 地应力; 最优布置方向

中图分类号: TD 322

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)04-1122-08

## Impact of In-situ Stress on Layout Direction of Deep Typical Gateways

Chen Denghong<sup>1,2,3</sup>, Hua Xinzhu<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Safety and High-efficiency Coal Mining of Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, P.R. China; 2. College of Energy and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, P.R. China; 3. Civil Engineering Postdoctoral Flow Station, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, P.R. China)

**Abstract:** In order to analysis the impact of in-situ stress on layout directions of deep gateway, High horizontal stress distribution characteristics of 20 group in-situ stress data from 7 piles in Huainan coal mine were acquired by reference and measurement. Against two gateways' sections were seriously contracted while their layout directions were consistent with high maximum stress on a first mining face in deep mine, compared Tresca theory with Gale theory, the former was more suitable for analyzing gateway's deformation and destruction state, The angle  $\beta$  between optimal layout direction of gateway and maximum horizontal principal stress direction was calculated by a point stress state, and the two gateways'  $\beta$  were  $45^\circ$ , According to gateways' stress difference were larger between sidewalls and roof, the stability on surrounding rock were worse, the deformation on surrounding rock affected by stress difference was reduced to 91% while the  $\beta$  turned from  $0^\circ$  to  $12^\circ$ . The replacement face's practice shows that: deformations on surrounding rock were improved slightly during same initial support scheme and support effect turned to be good while two anchor cables in sidewall and top corner were added and signal pillar timely support under later support schemes, the research result could be reference for gateway's layout and surrounding rock controlled under similar conditions.

**Keywords:** deep gateways; Tresca theory; in-situ stress; optimization layout direction

\* 收稿日期: 2018-01-06(修改稿)

作者简介: 陈登红(1986-),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事深部巷道围岩控制理论与支护技术方面的教学与研究工作。E-mail: ahhncdh@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(51504006, 51774010); 安徽省自然科学基金(1508085SQE211); 中国博士后科学基金(2016M592033); 安徽省博士后研究人员科研资助项目(2015B055)

0 引言

随着煤炭需求的日益增长和综采装备水平的不断提高,煤矿开采深度及强度逐年增加,淮南矿区各生产矿井逐步转向深部开采,矿区内 8 煤、11 煤、13 煤等新区主采煤层赋存稳定、厚度大、强度低,适宜综合机械化开采<sup>[1-8]</sup>。13-1 煤为全区主要可采煤层,厚度一般在 4 m 左右,煤层直接顶多为复合顶板,厚度变化大,底板岩性软,易底鼓。影响回采巷道围岩稳定性的埋深(600~900 m)、采高(2~6 m)、面长(200~320 m)、回采巷道断面形状(直墙拱、矩形)及尺寸(12~21 m<sup>2</sup>)较易统计,但作为引起深部回采巷道围岩、支护变形和破坏的根本原因的地应力不易直观反映,常常需要借助一定的监测元件<sup>[9-10]</sup>测试获得。因此,在结合已有相关地应力测试的文献资料<sup>[3,11-13]</sup>及地应力现场实测结果的基础上开展地应力对深部回采巷道布置方向的影响研究,对深部回采巷道的布置有重要的理论意义及工程应用价值。

1 地应力测试

1.1 测试方法

试验巷道分别选择在淮南矿区部分深部 13-1

煤煤巷及底板大巷,采用空心包体开展相关地应力测试。空心包体测量地应力是应力解除法测量地应力技术中的一种,它是通过改变岩体应力状态,使岩体产生应变响应的简捷方法。所谓钻孔应力解除技术,就是将一段岩石通过取芯(套芯技术)从周围岩体施加给它的应力场内隔离开来的方法,空心包体应变法应力解除钻孔结构如图 1 所示。

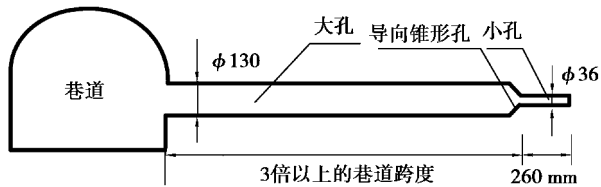


图 1 地应力测量钻孔结构示意图

Fig. 1 Sketch map of drilling structure by in-situ measurement

1.2 测试结果及分析

分别于新集一矿、新集二矿、口孜东矿、刘庄矿等不同埋深的大巷及回采巷道进行了地应力测试,结合已有文献的测试结果,获得的淮南矿区深部地应力场参数如表 1 所示。

表 1 淮南矿区深部地应力场参数

Table 1 Deep typical in-situ parameters of Huainan mine

矿名	深度/m	最大水平主应力/MPa	最小水平主应力/MPa	垂直应力/MPa	数据来源	矿名	深度/m	最大水平主应力/MPa	最小水平主应力/MPa	垂直应力/MPa	数据来源
新集一矿	-700	23.5	15.2	20.6	实测	望峰岗井	-817	20.3	17.1	17.2	文献 3
	-700	23.5	13.6	19.8	实测		-820	22.2	21.1	19.9	文献 10
	-700	23.1	15.0	20.2	实测		-843	20.1	11.8	18.5	文献 10
新集二矿	-740	19.3	13.4	17.4	实测	朱集煤矿	-1 020	27.5	17.4	21.3	实测
	-750.9	20.0	13.7	17.8	实测		-928	22.0	17.0	19.0	实测
	-750	22.5	14.2	19.7	实测		-965	23.2	13.0	21.0	实测
口孜东矿	-960.5	30.15	21.05	27.6	实测	刘庄煤矿	-743.6	22.25	12.75	16.5	实测
	-958.5	31.97	14.04	23.4	实测		-750.7	20.97	11.02	15.4	实测
	-958.3	37.27	20.63	24.3	实测		-749.6	19.83	11.58	16.4	实测
	-967	37.3	20.6	24.3	实测	顾桥煤矿南区	-817	30.7	17.8	18.1	文献 9

将实测结果绘成散点图,拟合得到淮南矿区深部地应力与采深的关系,如图 2 所示。

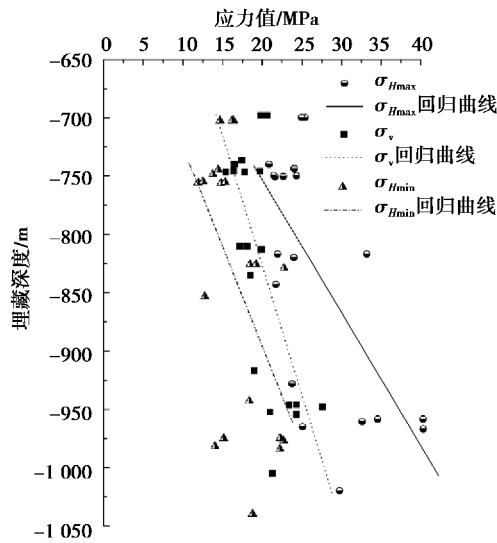


图 2 淮南矿区地应力与深度的关系

Fig. 2 Relationship between in-situ stress and depth of Huainan mine

利用最小二乘法处理相应的测试参数,得到淮南矿区深部围岩的地应力拟合公式如下(适用条件:埋深介于 700~1 020 m):

#### 1.2.1 700~1 020 m 的应力状态

(1) 水平最大主应力:

$$\sigma_{H_{\max}} = 0.032\ 73H + 1.387\ 39 \quad (1)$$

(2) 水平最小主应力:

$$\sigma_{H_{\min}} = 0.017\ 29H + 1.636\ 15 \quad (2)$$

(3) 垂直主应力:

$$\sigma_v = 0.023\ 7H + 1.038\ 56 \quad (3)$$

测试结果表明:淮南矿区深部(-700~-1 020 m)地应力场以构造应力为主,3 个主应力的关系是: $\sigma_{H_{\max}} > \sigma_v > \sigma_{H_{\min}}$ 。3 个主应力随深度呈线性增加,最大水平主应力与最小水平主应力相差很大,地应力场的方向性明显,最大水平主应力的方位角介于  $69.5^\circ \sim 122.29^\circ$  之间,属于  $\sigma_{HV}$  型应力场,与文献[8]的地应力实测结果较吻合。

数据处理得到淮南矿区深部围岩的应力不均系数、最大构造应力系数及侧压系数与开采深度的关系如图 3 所示。

#### 1.2.2 拟合相关表达式

(1) 应力不均系数:  $\Gamma = \sigma_{H_{\max}} / \sigma_{H_{\min}}$

$$\Gamma = 0.000\ 590\ 023H + 1.178\ 61 \quad (4)$$

(2) 最大构造应力系数:  $\Psi = \sigma_{H_{\max}} + \sigma_v$

$$\Psi = 0.000\ 219\ 532H + 1.053\ 57 \quad (5)$$

(3) 侧压系数:  $K = (\sigma_{H_{\max}} + \sigma_{H_{\min}}) / 2\sigma_v$

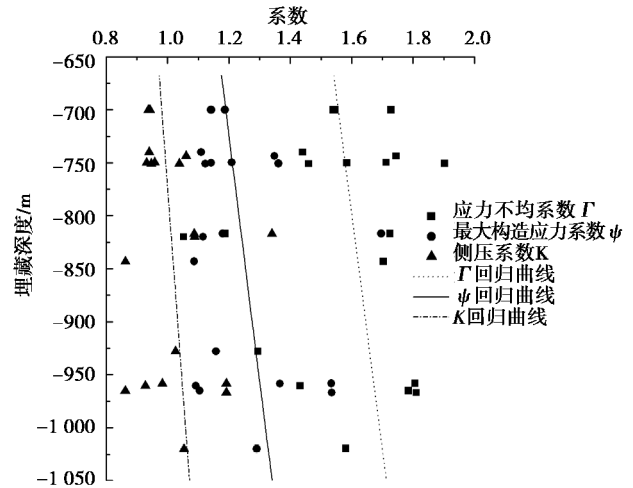


图 3 相关系数与深度关系

Fig. 3 Several coefficients change with depth

$$K = 0.000\ 069\ 446\ 4H + 0.943\ 32 \quad (6)$$

侧压系数  $K$  随深度的变化不是很明显,总体上分布在 1 左右。最大构造应力系数介于 1.25 左右,应力不均系数超过 1.5,且随开采深度的增加明显增大。

## 2 地应力对深部回采巷道布置方向的影响

### 2.1 不同理论下高水平应力对回采巷道围岩稳定影响分析

根据上述地应力实测结果,按最大水平应力理论<sup>[14]</sup>指导,深部回采巷道布置方位(走向)与最大水平主应力方向一致时,围岩变形破坏理最小,但某深部矿井首采面(埋深近 900 m)两顺槽走向与实测的最大水平主应力方向基本一致,均为  $112^\circ$ ,回采期间机、风巷支护体变形失效,滞后补打的信号柱压裂失稳,巷道断面收缩严重等强烈矿压显现(图 4),揭示按最大水平应力指导及现有支护参数下围岩变形破坏未能得到有效控制。



(a) 补打信号柱压裂失稳

(b) 断面收缩严重

图 4 深部回采巷道变形破坏实拍

Fig. 4 Deformation and destruction on deep gateway

究其原因,最大水平应力理论指导深部回采巷道布置方位时忽略了2点<sup>[15]</sup>:

(1)巷道走向沿最大水平主应力布置时,即最小水平应力垂直于巷道两帮,当其与垂直应力相差很大时,根据 Tresca 的最大剪应力理论,垂直主应力与最小水平应力的应力差应是巷道围岩不稳定的主要影响因素之一。

(2)深部回采巷道开掘后至工作面回采期间,巷帮垂直应力通常高于水平应力。因此,对于回采巷道围岩稳定性控制而言,与最大主应力方向成一定夹角布置的回采巷道有可能使巷道垂直应力与水平应力的应力差值相对减小,更有利于回采巷道围岩长期稳定(详细分析见2.2节),最大水平应力理论下的围岩应力状态与实际掘进回采期间的围岩应力状态对比如图5(a)、(b)所示。

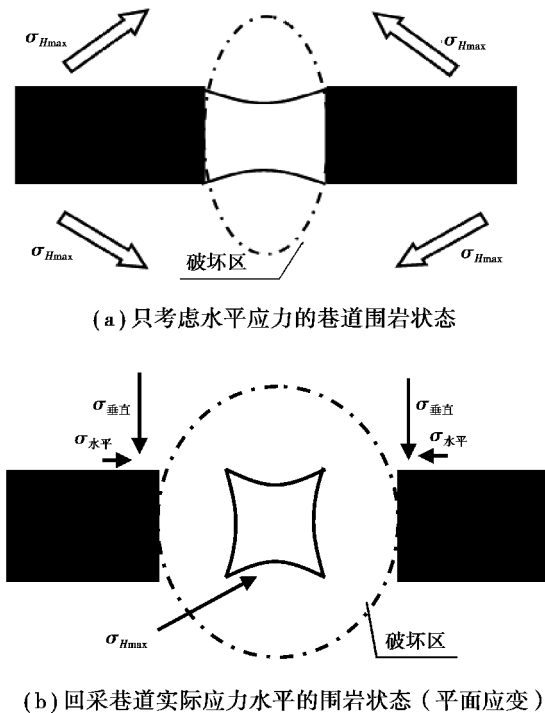


图5 不同条件下的围岩状态对比

Fig. 5 Comparison of surrounding rock state under different conditions

## 2.2 最优巷道布置方向分析

水平应力对巷道布置的影响逐渐得到人们的认识和重视。如图6所示,拟定深部回采巷道轴向沿 $z$ 轴方向布置,垂直巷道帮部应力为 $\sigma_n$ ,平行巷道轴向应力为 $\sigma_z$ ,巷道顶板的垂直应力为 $\sigma_v$ ,巷道周围主应力场如图6(b)所示,设 $\sigma_z$ 与最小水平主应力 $\sigma_h$ 夹角为 $\alpha$ ,与最大水平应力 $\sigma_H$ 夹角为 $\beta$ 。

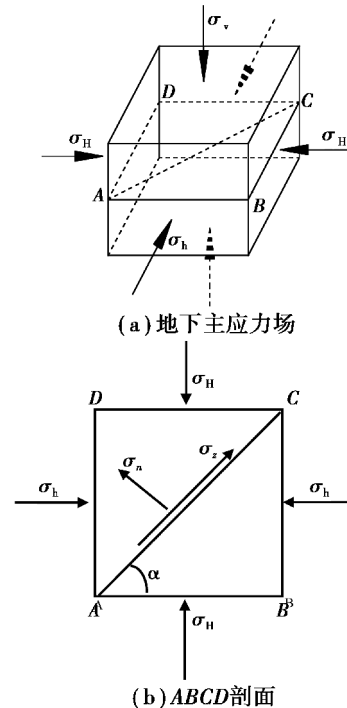


图6 巷道开掘围岩应力分布

Fig. 6 Distribution of stress while drilling gateways

已有实测结果表明,淮南矿区的地应力 $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ ,属于 $\sigma_{Hv}$ 型应力场。在 $\sigma_{Hv}$ 型应力场中,欲使巷道围岩稳定的最佳巷道布置方向应使垂直巷道帮部的应力与顶板应力相当,即满足式(8)<sup>[16]</sup>:

$$\begin{cases} \sigma_n = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \cos 2\alpha \\ \tau_n = \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \sin 2\alpha \end{cases} \quad (7)$$

$$\sigma_n = \sigma_v \quad (8)$$

联立式(7)、式(8)可得最小主应力与巷道轴向的最佳夹角为:

$$\alpha = \frac{1}{2} \arccos \left( \frac{\sigma_H + \sigma_h - 2\sigma_v}{\sigma_H - \sigma_h} \right) \quad (9)$$

地应力测试结果表明:淮南矿区深部地应力场以水平构造应力为主,垂直主应力 $\sigma_v$ 近似为静水压力。设 $\sigma_v = \gamma H$ ,根据深部回采巷道的高水平应力分布特点,计算得到不同侧压系数下回采巷道走向(轴向)与最大主应力所夹的最优布置角如表2。代入 $H = 900 \text{ m}$ 于式(5)、式(6),可得 $\sigma_H = 1.25\gamma H$ ,  $K=1$ ,则 $\sigma_h = 0.75\gamma H$ 。

从表2中可查询到最大水平主应力 $\sigma_H = 1.25\gamma H$ ,最小水平主应力 $\sigma_h = 0.75\gamma H$ 时, $\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \arccos(0) = 45^\circ$ (换算为弧度),此角度为巷道走向与最大水平主应力方向所夹最佳角度 $\beta$ 。

表 2 巷道布置最佳夹角  $\beta$  随主应力变化关系  
Table 2 The optimal angle of gateway changes with the principal stress

最大构造 应力系数	最小构造应力系数										
	1.05	1.15	1.25	1.35	1.45	1.55	1.65	1.75	1.85	1.95	2.05
0.95	45.0	30.0	24.1	20.7	18.4	16.8	15.5	14.5	13.6	12.9	12.3
0.85	60.0	45.0	37.8	33.2	30.0	27.6	25.7	24.1	22.8	21.7	20.7
0.75	65.9	52.3	45.0	40.2	36.7	34.0	31.8	30.0	28.5	27.2	26.0
0.65	69.3	56.8	49.8	45.0	41.4	38.6	36.3	34.4	32.7	31.3	30.0
0.55	71.6	60.0	53.3	48.6	45.0	42.2	39.8	37.8	36.1	34.6	33.0
0.45	73.3	62.5	56.0	51.4	47.8	45.0	42.6	40.6	38.8	37.3	35.9
0.35	74.5	64.3	58.2	53.8	50.3	47.4	45.0	42.9	41.2	39.6	38.2
0.25	75.6	65.9	60.0	55.7	52.3	49.5	47.1	45.0	43.2	41.6	40.2
0.15	76.4	67.2	61.6	57.3	53.9	51.2	48.9	46.8	45.0	43.4	42.0
0.05	77.1	68.4	62.8	58.8	55.5	52.8	50.4	48.4	46.6	45.0	43.6

据式 (10) 最大剪应力破坏准则可知, 巷道帮顶应力差值越大, 围岩稳定性越差。

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \tag{10}$$

当最小主应力与巷道轴向夹  $90^\circ$  角时 ( $\beta$  为  $0^\circ$  时), 应力差值最大, 为  $0.25\gamma H$ , 以此为分母, 计算其他不同角度的应力差与其比值, 换算为百分比, 用以分析巷道布置角度对围岩变形的影响程度, 如表 3 所示。

表 3 巷道布置角度对围岩变形的影响程度  
Table 3 The influence of angle layout of gateways on surrounding rock deformation

$\beta/(^\circ)$	$\frac{\sigma_n}{\sigma_v}$	影响程度/%
0	0.750	100
10	0.765	94
12	0.770	91
20	0.810	77
30	0.880	50
45	1.000	0

淮南矿区某深部矿井首采面机、风巷围岩变形严重, 修复加固工程量大, 结合 2.2 节的剪应力理论分析绘制该回采巷道巷帮与顶板应力的比值随夹角  $\beta$  的变化如图 7 所示。结果表明: 随夹角增大, 巷帮应力逐渐接近顶板应力, 应力差减小。当与最大水平主应力呈  $45^\circ$  夹角时, 应力差最小, 此

时巷道围岩将最为稳定。

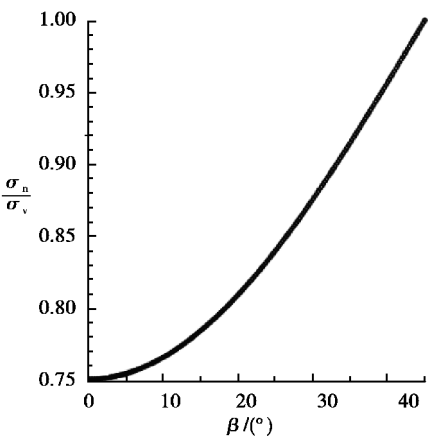


图 7 巷帮与顶板应力比值随  $\beta$  的变化曲线  
Fig. 7 Curves of stress ratio on sidewalls and floor changes with  $\beta$

3 工程实践

以 2.1 节某深部矿井首采面两回采巷道强烈矿压显现问题为出发点, 将 2.2 节的理论计算结果应用于接替面的工程实践后得到: 接替面机、风巷布置时兼顾煤层走向分布特征及边界断层影响等, 设计巷道布置的方位角  $124^\circ$ , 与实测的最大水平主应力方向夹  $12^\circ$ , 示意图如图 8 的 4 条上山左侧所示, 此时较首采面两巷布置的围岩变形应力差的影响程度降至 91%。初期支护方案相同时巷道围岩变形略有改善, 后期支护方案改为帮、顶角增加两根锚索外加信号柱及时补强, 初期及补强支护方



案及参数如图 9,首采面与接替面回采巷道服务期内累积围岩变形实测结果如表 4 所示,现场实拍优化布置方位及支护方案的接替面机巷支护断面效果如图 10 所示。结果表明:布置方位角优化及支护方案强化后的深部回采巷道断面变形量较小,接替面机巷支护效果良好,能满足安全生产的通风断面的要求(不小于 9 m<sup>2</sup>)。

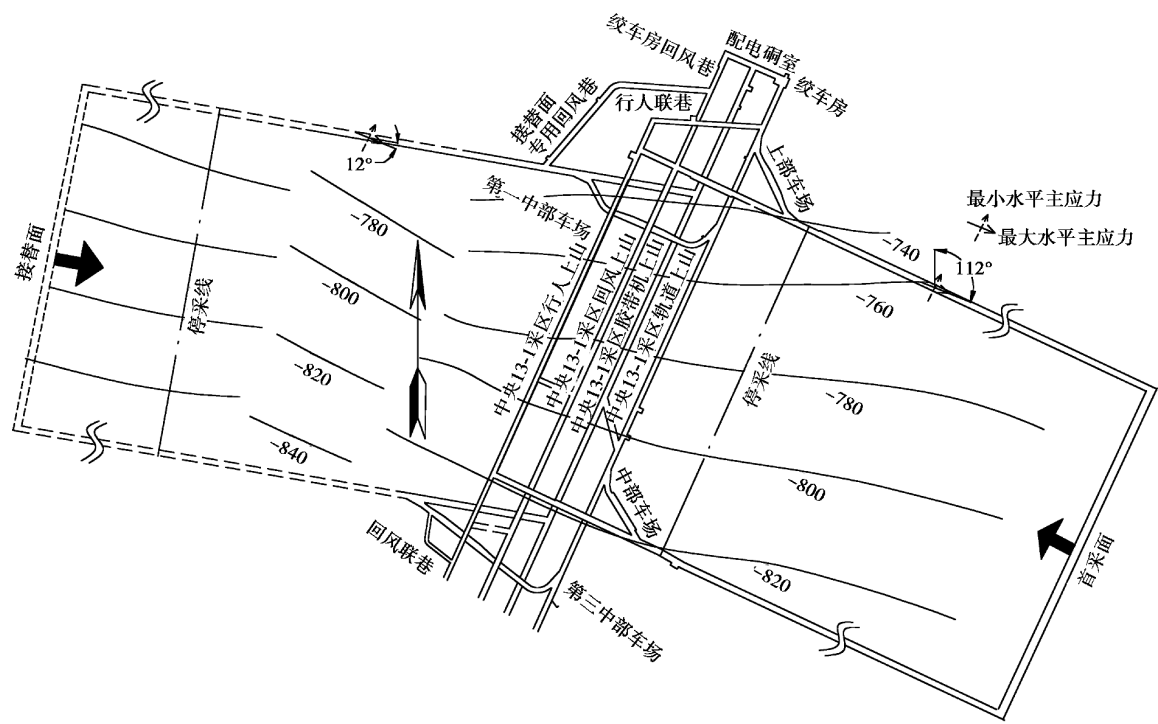


图 8 首采面及接替面回采巷道布置示意图(单位:m)

Fig. 8 Layout diagram of gateways on first mining face and succession face (unit: m)

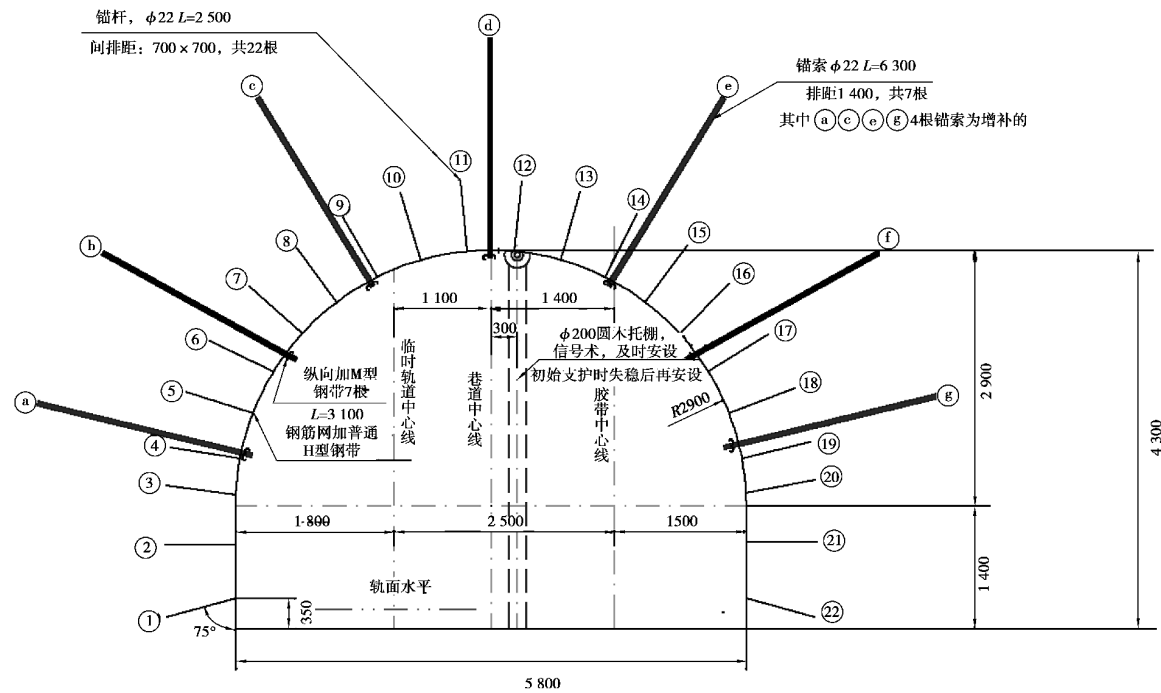


图 9 初始及补强支护方案(单位:mm)

Fig. 9 Initial support scheme and strengthening support scheme (unit: mm)

表4 不同布置方位及支护方案下

深部回采巷道围岩累积变形 mm

Table 4 Accumulated deformation on surrounding rock in deep mining roadway under different layout directions and support schemes mm

对比项变形情况	顶底移近量	两帮收敛量
首采面两巷	2 887	2 234
接替面初期支护方案两巷	2 236	1 859
接替面优化支护方案后两巷	1 025	823



图10 优化布置方位及支护方案后接替面机巷断面实拍

Fig. 10 Photo of section on transport gateway in replacement

face after layout direction and support scheme optimized

## 4 结论

(1)深部回采巷道的地应力实测结果表明:淮南矿区深部地应力场以构造应力为主,3个主应力的关系是: $\sigma_{H_{\max}} > \sigma_v > \sigma_{H_{\min}}$ ,最大水平主应力的方位角介于 $69.5^\circ \sim 122.29^\circ$ 之间,侧压系数 $K$ 随深度的变化不是很明显,总体上分布在1左右,应力不均系数随开采深度的增加明显增大。

(2)对比最大水平应力理论,Tresca的剪应力理论更适合深部回采巷道围岩稳定性分析,减少高应力差、优化回采巷道布置方向是维护深部回采巷道围岩稳定的关键。基于此,计算得到不同侧压系数下回采巷道走向(轴向)与最大主应力方向所夹的最优布置角。

(3)以淮南矿区某深部矿井首采面的机、风巷围岩变形严重为工程背景,基于剪应力理论,计算

得到首采面及接替面两巷最优布置方位与实测的最大水平主应力方向夹 $45^\circ$ 角。考虑到煤层走向分布特征及边界断层影响优化了接替面的回采巷道布置方向与实测的最大水平主应力方向夹 $12^\circ$ 角,此时较首采面两巷布置的围岩变形应力差影响程度降至91%。初期支护方案相同时,巷道围岩变形略有改善,后期支护方案改为帮顶角增加两根锚索外加信号柱及时补强后,支护效果最终良好,研究结果为类似条件下巷道布置与围岩稳定性控制提供了一定参考。

## 参考文献(References)

- [1] 袁亮. 深井巷道围岩控制理论及淮南矿区工程实践[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2006. (Yuan Liang. Control of surrounding strata in deep mine roadway and practice in Huainan areas [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2006. (in Chinese))
- [2] 袁亮. 淮南矿区煤巷稳定性分类及工程对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增2): 4790-4794. (Yuan Liang. Stability classification of coal roads in Huainan mining area and engineering countermeasures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(Supp. 2): 4790-4794. (in Chinese))
- [3] 张农, 王成, 高明仕, 等. 淮南矿区深部煤巷支护难度分级及控制对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2421-2428. (Zhang Nong, Wang Cheng, Gao Mingshi, et al. Roadway support difficulty classification and controlling techniques for Huainan deep coal mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2421-2428. (in Chinese))
- [4] 李海燕, 刘玉萍, 秦佳之, 等. 煤矿深井开采的合理经济深度研究[J]. 地下空间与工程学报, 2008(4): 645-648. (Li Haiyan, Liu Yuping, Qin Jiazhi, et al. Study on the Proper and Economical Exploitation Depth of Deep Coal Mining [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008(4): 645-648. (in Chinese))
- [5] 孔祥勇, 杨科, 陆伟. 大倾角煤层群下行开采底板破坏机理及工程应用[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(S2): 394-400. (Kong Xiangyong, Yang Ke, Lu Wei.

- Floor Failure Mechanism and Engineering Application of Downward Mining of the Large Dip Angle Coal Seam Group[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(S2): 394-400. (in Chinese))
- [6] 袁亮, 薛俊华, 刘泉声, 等. 煤矿深部岩巷围岩控制理论与支护技术[J]. 煤炭学报, 2011, 36(4): 535-543. (Yuan Liang, Xue Junhua, Liu Quansheng, et al. Surrounding rock stability control theory and support technique in deep rock roadway for coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(4): 535-543. (in Chinese))
- [7] 霍亮. 深埋巷道围岩变形特征与控制措施研究[D]. 合肥: 安徽理工大学, 2012. (Huo Liang. Buried surrounding rock deformation characteristics and control methods [D]. Hefei: Anhui University of Science & Technology, 2012. (in Chinese))
- [8] 刘钦甫, 刘衡秋, 彭苏萍, 等. 淮南煤田 13-1 煤层顶板地质特征与稳定性研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(3): 318-322. (Liu Qinpu, Liu Hengqiu, Peng Suping, et al. The roof geological features and stability of coal-bed No. 13-1 in Huainan coal-field. [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(3): 318-322. (in Chinese))
- [9] 孟庆彬, 韩立军, 乔卫国, 等. 基于地应力实测的深部软岩巷道稳定性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(5): 922-927. (Meng Qingbin, Han Lijun, Qiao Weiguo, et al. Research on deep soft roadway stability based on in-site geo-stress measurement [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(5): 922-927. (in Chinese))
- [10] 刘军强, 施建仁, 王水晶, 等. 地应力测量在深埋长大隧道岩爆预测中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(4): 776-780, 788. (Liu Junqiang, Shi Jianren, Wang Shuijing, et al. Application of geostress measurement for rockburst forecast in deep-buried long and large tunnels [J]. Chinese Journal of underground space and engineering, 2011, 7(4): 776-780, 788. (in Chinese))
- [11] 罗超文, 李海波, 刘亚群. 煤矿深部岩体地应力特征及开挖扰动后围岩塑性区变化规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1613-1618. (Luo Chaowen, Li Haibo, Liu Yaquin. Characteristics of in-situ stress and variation law of plastic zone of surrounding rocks around deep tunnel in a coal mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1613-1618. (in Chinese))
- [12] 刘泉声, 刘恺德. 淮南矿区深部地应力场特征研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 2089-2096. (Liu Quansheng, Liu Kaide. Characteristics of in-situ stress field for deep levels in Huainan coal mine [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(7): 2089-2096. (in Chinese))
- [13] 高照宇, 荣海, 包小龙, 等. 林西矿地应力场特征及区域构造作用研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(S1): 129-133. (Gao Zhaoyu, Rong Hai, Bao Xiaolong, et al. Study on In-situ Stress Field Characteristic and Regional Tectonic Force in Linxi Coal Mine [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(S1): 129-133. (in Chinese))
- [14] Gale W J. Strata. Control utilising rock reinforcement techniques and stress control methods, in Australian coal mines [J]. Mining Engineer (London), 1991, 150: 247-253.
- [15] 陈登红. 深部典型回采巷道围岩变形破坏特征及控制机制研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2014. (Chen Denghong. Research on fractured deformation characteristics and control mechanism of surrounding rock on deep typical gateways [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2014. (in Chinese))
- [16] 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): 891-895. (Sun Yufu. A effects of in-situ horizontal stress on stability of surrounding rock roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 891-895. (in Chinese))