

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2017.03.027

# 大倾角煤层回采巷道断面适应性

曹树刚<sup>1,2</sup>, 王 帅<sup>1,2</sup>, 王寿全<sup>3</sup>, 杨红运<sup>1,2</sup>

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400044;  
3. 四川省煤炭产业集团有限责任公司, 四川 成都 610091)

**摘 要:** 基于大倾角煤层回采巷道围岩应力显现规律,采用数值分析方法对不同类型断面巷道的围岩塑性区及应力非对称分布特征进行研究,并建立异形断面巷道围岩破坏力学模型,确定其合理的支护方式.结果表明,大倾角煤层回采巷道围岩塑性区沿煤层倾斜方向演化,顶底板破坏深度大于两帮,且两帮破坏程度差异大;巷道断面形状不同,导致巷道围岩应力集中程度、塑性区及变形量等有很大差异;拱形巷道围岩变形适应性好,异形巷道两侧的顶角煤易发生剪切破坏,但考虑回采巷道掘进、设备运行及服务年限等需求,常用异形巷道;采用“锚网+钢带+锚索”的支护形式,加强异形巷道顶板帮及坡顶煤的支护,满足支护阻力大于 $F_1$ 和 $F_2$ ,可明显减少巷道围岩变形,保持巷道的稳定性.

**关 键 词:** 大倾角煤层;断面形状;应力卸载区;应力拱;异形断面

**中图分类号:** TD 353      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2017)03-0436-06

## Adaptability of Roadway Section Shape in Deep Inclined Seam

CAO Shu-gang<sup>1,2</sup>, WANG Shuai<sup>1,2</sup>, WANG Shou-quan<sup>3</sup>, YANG Hong-yun<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. School of Resource and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Sichuan Coal Industry Group Limited Liability Company, Chengdu 610091, China. Corresponding author: CAO Shu-gang, professor, E-mail: caosg@cqu.edu.cn)

**Abstract:** Based on distribution of surrounding rock stress in deep inclined seam roadway, the asymmetric distribution law of the plastic zone and stress of different cross-section roadway were studied by using numerical method, and a mechanical model of special-section roadway was established to determine the reasonable support mode. The results show that deep inclined seam roadway plastic zones extend along the dip direction of coal seam, failure of roof and floor is greater than that of ribs, and what is more, different damage and failure occur in ribs; the roadway shape affects the stress concentration, plastic zone and deformation; arched roadway adapts well, and special-shaped tunnel is likely to lead to shear failure-prone in the roof side corner, but taking roadway service life and mining issues into account, special-shaped tunnel can meet the requirements under the existing support conditions. The combination supports of “anchor net + steel band + anchor rope” are adopted to strengthen the rib beside roof and the roof coal for special-shaped tunnel, and the support stress should be above  $F_1$  and  $F_2$ . By this way, surrounding rock deformation is obviously reduced and the roadway can stay stable.

**Key words:** deep inclined seam; section shape; unloaded stress; stress arch; special-section

回采巷道是采煤工作面通风、对外运输的重要通道.研究表明,大倾角煤层(煤层倾角在 $35^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 之间)回采巷道变形破坏特征表现出明显的非对称性.在进行回采巷道设计时,不仅要考

虑围岩性质和地应力,还应考虑施工要求、巷道服务年限、断面形状及断面尺寸等.因此,开展大倾角煤层回采巷道稳定性研究,对煤矿安全生产具有重要意义<sup>[1]</sup>.近年来,随着对回采巷道围岩破

坏规律研究的深入,发现回采巷道围岩变形及破坏特征呈现明显的倾角效应<sup>[2]</sup>. 文献[3-5]研究巷道断面形状对回采巷道稳定性的影响,发现圆弧拱巷道围岩稳定性要远大于矩形巷道. 考虑现场施工要求,大倾角煤层回采巷道多采用异形断面(也称五边形断面). 文献[6-9]采用数值分析和理论分析的方法对大倾角煤层回采巷道围岩失稳特征进行分析,发现顶板失稳形态具有非对称破断特征,破坏位置首先出现在顶板中部或偏中上部,两帮失稳主要表现为三角形破断体剪切滑移,两帮上部顶角破坏严重,揭示了大倾角煤层回采巷道围岩力学特征非对称演化机理,提出采用锚网索主动联合支护方式,通过施加足够的预应力,加强对关键部位的控制.

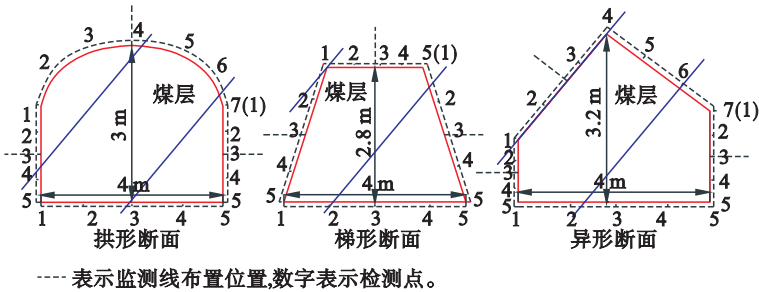
以往对巷道断面类型的研究大多没有结合巷道现场施工条件,对巷道服务年限、用途等条件考虑较少. 本文以川煤集团为背景,考虑到川煤集团煤层赋存条件复杂,大倾角煤层居多,应用的巷道断面类型主要有 3 种,分别为拱形、梯形和异形巷道,不同断面类型巷道围岩变形破坏特征差异较大. 为研究巷道断面形状对围岩稳定性的影响,优化大倾角煤层回采巷道断面设计,本文采用理

论分析和数值模拟方法,分析了大倾角条件下拱形、梯形和异形巷道围岩破坏规律. 考虑到巷道施工条件,确定大倾角条件下适宜采用异形断面巷道;通过建立巷道变形破坏力学模型,对异形巷道围岩破坏过程进行重点分析. 研究成果可以为大倾角条件下煤层回采巷道断面选择及支护设计提供依据.

### 1 回采巷道断面应用调查

经统计,川煤集团下属矿井煤层赋存条件复杂,大倾角煤层所占比例较大,应用的巷道断面类型主要有 3 种(见图 1). 为研究大倾角煤层回采巷道稳定性,采用地质雷达,对部分大倾角煤层回采巷道进行松动圈测试. 本文共统计大倾角( $40^{\circ} \sim 55^{\circ}$ )松动圈测试巷道 17 条,见表 1;对比分析了煤层赋存条件相似的三类断面巷道松动圈尺寸见表 2.

表 1 大倾角断面统计				
Table 1 Large angle section statistics				
变量	拱形巷道	梯形巷道	异形巷道	合计
数量	3	5	9	17
应用比例/%	18	29	50	100



---表示监测线布置位置,数字表示检测点。  
图 1 回采巷道断面形状及测点布置示意图

Fig. 1 Roadway cross-section shape and measuring points schematic

表 2 不同断面松动圈尺寸					
Table 2 Loose ring size of different sections					
巷道名称	断面形状	煤层倾角/( $^{\circ}$ )	直接顶厚度/采高	直接顶岩性(硬度)	松动圈参数
赵家坝 1726 平巷	拱形	52	2.5	5	顶板:0~2.5 m;底板帮:0~2 m;
赵家坝 1723 平巷	梯形	52	2.5	5	顶板:0~4.5 m;底板帮:0~3 m;
李子垭南 4131 北机巷	异形	50	2.0	6	顶板:0~7 m,顶、底板帮:0~4 m;

由表 1 和表 2 可以看出,大倾角煤层中拱形巷道应用较少,低于 20%;异形巷道应用较为广泛,约占到 50%。松动圈测试结果表明,异形巷道和梯形巷道松动圈尺寸明显大于拱形巷道.

### 2 不同断面回采巷道围岩稳定性分析

#### 2.1 模型构建

基于离散元理论开发的 3DEC 数值模拟软

件<sup>[10]</sup>能够较好地模拟非连续节理煤、岩体中巷道开挖后塑性区演化过程. 本文以川煤集团李子垭煤矿 K1-1 煤层为研究对象,利用 3DEC 数值模拟软件,考虑节理面影响,进行大倾角煤层回采巷道断面形状适应性研究. K1-1 煤层平均厚度 1.8 m,倾角  $43^{\circ} \sim 55^{\circ}$ ,平均  $50^{\circ}$ ,工作面埋深 520 m. 根据岩性及物理力学试验确定各岩层物理力学参数,见表 3.

采用摩尔库仑准则和拉伸破坏准则<sup>[11]</sup>,建立平面应变模型,模拟巷道开挖过程.考虑边界效应,建立的模型尺寸为 $X \times Y \times Z = 50\text{ m} \times 1\text{ m} \times 50\text{ m}$ ,巷道跨度4 m.模型底部及左右两侧设置位移边界条件,顶部施加等效垂直载荷11.5 MPa,内部施加初始水平及垂直应力,侧压系数为1.2,并在巷道周围7.5 m范围内布置应力及位移监测点.测点布置如图1所示.

2.2 巷道围岩塑性区及应力分布

通过数值分析,得到不同断面塑性区分布、塑

性区深度及表面最大变形量曲线,见图2和图3.

由图2和图3可以看出,巷道断面形状对巷道围岩塑性区深度及围岩变形量影响较大.

1) 拱形巷道两帮及顶底板煤体侧出现拉破坏,两帮移近量约为58 mm,顶板帮移近量大于底板帮移近量,坡顶煤下沉量为110 mm,塑性区最大深度达到4 m;由于水平应力大于垂直应力,顶底板破坏深度明显大于两帮<sup>[12]</sup>,顶板最大位移量为35 mm;底板受拉应力作用,破坏严重.塑性区深度小于梯形和异形巷道.

表 3 岩体的物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of rock mass

岩性	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
粉砂岩	15.2	6.67	2 550	3.25	38	2.5
砂质泥岩	8.00	3.89	2 500	2.12	30	2.1
煤层	5.10	2.13	1 450	1.17	12	0.3
泥岩	7.14	3.20	2 100	3.30	20	1.8



图 2 不同断面巷道塑性区分布

Fig. 2 Plastic zone distribution of different cross-section shapes

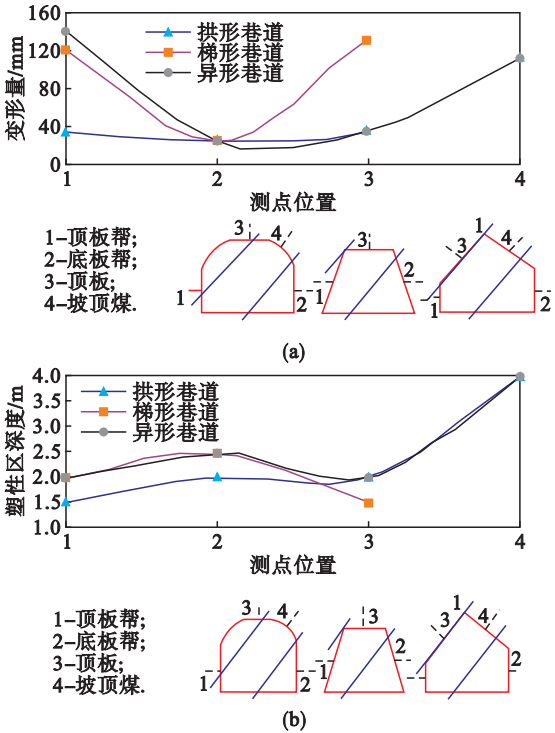


图 3 巷道围岩变形量及塑性区深度

Fig. 3 Deformation and plastic zone depth of surrounding

(a)—巷道围岩变形量;(b)—巷道围岩塑性区分布.

2) 梯形巷道顶板及顶板帮为煤体,底板及底板帮为岩体.巷道开掘后,巷道围岩塑性区分布不均.在重力及水平应力的作用下,顶板变形量达到130 mm;底板帮拉剪破坏区域较小,移近量约为24 mm,塑性区分布与异形巷道相似.

3) 异形断面巷道塑性区及应力分布与梯形断面巷道相似.由于异形断面巷道保持了顶板的完整性,顶板拉破坏深度明显小于梯形巷道,顶板移近量约为33 mm;坡顶煤在重力及二次应力作用下,发生拉剪破坏,破坏深度为4 m,变形量达到110 mm;底板部分为煤体,煤体侧发生拉剪破坏范围较大.

2.3 巷道围岩应力及变形规律

受岩层倾角效应影响,巷道围岩不同部位的变形量及应力分布规律不同.三类断面巷道顶板帮、底板帮、顶板及底板表面位移及应力分布见图4.

1) 顶板帮.由图4a位移曲线可以看出,拱形巷道顶板帮岩体部分移近量小,左侧底脚为破碎煤体,移近量大;梯形巷道与异形巷道顶板帮大部分为煤体,变形量达到150 mm,底脚近似处于三向应力状态,变形量较小.由应力曲线可以看出,拱形巷道顶板帮应力变化幅度大,在岩层沿倾向分力作用下,拱角处煤岩接触面发生层间错动,处于受拉状态,底脚处于三向应力状态,承载能力增强,出现压应力集中;异形巷道与梯形巷道水平应力变化趋势相似,煤岩交界处出现拉应力,破坏形式主要为拉剪破坏,破坏区域大.

2) 底板帮.由图4b位移曲线可以看出,除梯



形巷道1号测点外,其余断面测点均位于岩体内;三类断面巷道围岩变形规律相似,中间部位位移有增大趋势.由应力曲线可以看出,三类巷道在底板帮中间部位都出现拉应力,顶底角位置受到顶底板限制作用,出现压应力集中;异形巷道受顶板垂向应力作用明显,受拉区域大;由于拱形巷道顶板成拱作用,水平应力介于异形巷道和梯形巷道之间.

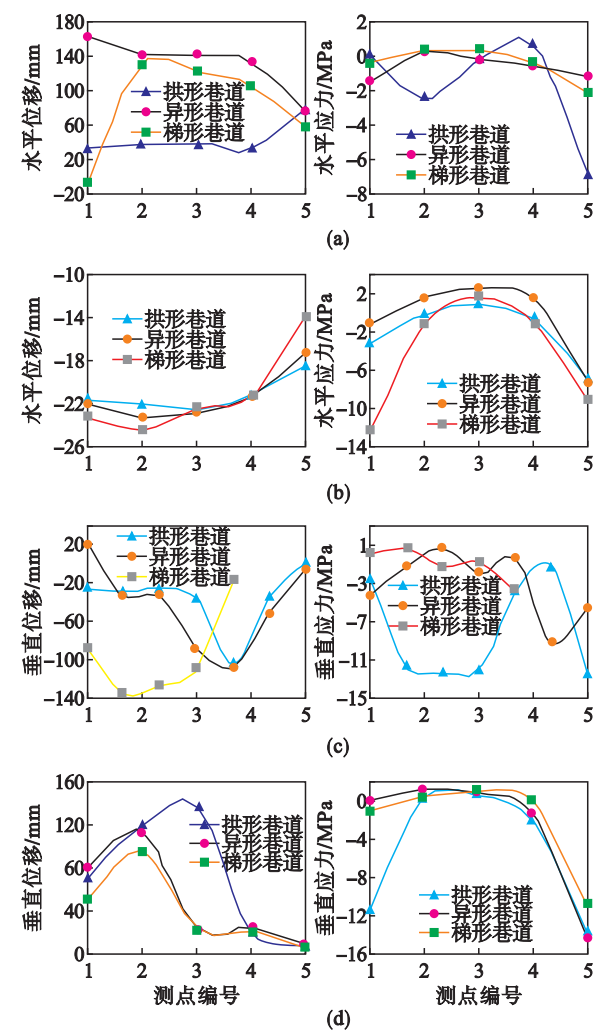


图4 巷道表面围岩位移及应力变化曲线  
Fig. 4 Displacement and stress curves of surrounding

(a) —顶板帮水平位移及应力变化规律;  
(b) —底板帮水平位移及应力变化规律;  
(c) —顶板垂直位移及应力变化规律;  
(d) —底板垂直位移及应力变化规律.

3) 顶板. 由图4c位移曲线可以看出,三种断面巷道顶角及岩体段移近量小,中间靠煤体段移近量大.由应力曲线可以看出,受成拱作用,拱形巷道岩体段承载能力强;异形巷道和梯形巷道局部出现拉应力,煤体段和煤岩交界处承载能力弱.

4) 底板. 由图4d位移曲线可以看出,三类断面巷道靠顶板帮侧为煤体,底臃量大;底板帮侧为

岩体,底臃量较小.由应力曲线可以看出,三类巷道底板煤体部位应力卸载明显;受两帮支撑压力作用,在煤岩交界处及煤体侧出现拉应力.

### 3 巷道围岩破坏失稳机理分析

#### 3.1 大倾角煤层回采巷道断面形状适应性分析

数值分析结果表明,拱形巷道围岩适应性好,梯形巷道次之.确定巷道断面形状,除了要考虑围岩性质,还要考虑巷道掘进施工工艺、服务年限及生产要求等.拱形巷道成形困难,施工工艺复杂,掘进成本高;梯形巷道及异形巷道施工相对容易,成本低,且回采巷道服务年限短,在现有支护条件下可以满足正常生产需要.考虑到回采巷道内设备布置,方便工作面端头煤炭运输及回采工作面侧围岩支护,认为异形巷道是大倾角煤层回采巷道的最佳选择,其次为梯形巷道.

#### 3.2 异形巷道围岩破坏失稳机理分析

受倾角效应影响,大倾角煤层巷道围岩力学结构复杂.根据式(1)和式(2),当煤层倾角 $\alpha$ 大于 $45^\circ$ 时, $q_1$ 小于 $q_2$ ,围岩破坏形式主要表现为沿层理面方向发生剪切滑移.

$$q_1 = q \cos \alpha, \quad (1)$$

$$q_2 = q \sin \alpha. \quad (2)$$

式中: $q$ 为上覆岩层应力载荷集度; $\alpha$ 为煤层倾角; $q_1$ 为垂直顶板分力; $q_2$ 为倾向分力.

根据数值模拟结果,异形巷道开挖后,两帮三角煤体在自重及上覆岩层倾向分力作用下,沿煤岩接触处易发生剪切滑移破坏,两帮承载能力降低,进而引起顶板失稳,顶底板移近量增加.为研究巷道开掘后围岩破坏规律,根据静力学平衡原理及岩石库伦破坏准则,建立如图5所示的两帮顶角局部破坏力学模型.假设岩体为各向同性连续介质、小变形,岩体内受均布载荷作用;由于仅考虑巷道围岩表面受力,可忽略水平应力,只考虑垂直应力作用<sup>[12]</sup>.

由图5可以看出,块体DEF在顶板载荷倾向分力作用下,发生拉破坏;块体AGH在顶板载荷倾向分力作用下,发生压剪破坏.

图5中, $w_1, w_2$ 分别为块体DEF和AGH自重; $q$ 为顶板载荷集度; $F_1, F_2$ 为支护阻力; $\alpha$ 为煤层倾角; $\beta$ 为考虑煤体剪切作用以后的剪切角,即GH面与竖直方向夹角; $c_0, c_w$ 分别为煤体和煤岩接触面的黏聚力; $\varphi_0, \varphi_w$ 分别为煤体和煤岩交界面内摩擦角; $L_1, L_2, L_3, L_4$ 分别为剪切面DE, DF, AG, GH的长度; $h$ 为煤层厚度.假设巷道开挖后,

坡顶煤  $DEF$  在自重和顶板载荷作用下沿  $DE$  面和  $DF$  面垮落;为保证块体不垮落,需施加支护力  $F_1$ .

坡顶煤块体  $DEF$  受力包括顶板载荷  $Q_1$ 、煤体自重  $w_1$ 、支护阻力  $F_1$  以及层面作用力. 其中,

$$Q_1 = qL_1 \cos \alpha, \tag{3}$$

$$w_1 = \frac{1}{2} \gamma g L_1 L_2. \tag{4}$$

式中: $\gamma$  为煤体体积力; $g$  为重力加速度; $L_1, L_2$  分别为  $DE, DF$  长度.

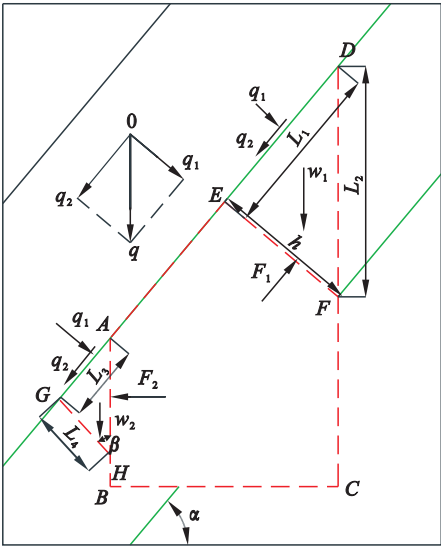


图 5 回采巷道关键部位受力分析图  
Fig. 5 Stress analysis diagram of key parts of roadway

根据库仑强度准则,坡顶煤块体  $DEF$  发生垮落的临界条件是沿  $DE$  面和  $DF$  面同时发生剪切破坏,即满足:

$$F_1 - (Q_1 + w_1) \sin \alpha = Q_1 \cos \alpha \tan \varphi_w + c_w L_1, \tag{5}$$

$$Q_1 + w_1 - F_1 \sin \alpha = F_1 \cos \alpha \tan \varphi_0 + c_0 L_2. \tag{6}$$

求得  $DE$  面和  $DF$  面不发生剪切破坏的临界支护阻力  $F_{1-1}, F_{1-2}$  为

$$\left. \begin{aligned} F_{1-1} &= Q_1 \cos \alpha \tan \varphi_w + c_w L_1 + (Q_1 + w_1) \sin \alpha, \\ F_{1-2} &= \frac{Q_1 + w_1 - c_0 L_2}{\cos \alpha \tan \varphi_0 + \sin \alpha}. \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

保证块体  $DEF$  不垮落,临界支护阻力应取  $F_{1-1}, F_{1-2}$  中最大值,如式(8)所示:

$$F_1 = \max \{ F_{1-1}, F_{1-2} \}. \tag{8}$$

同理,对顶板帮顶角块体  $AGH$  进行受力分析.块体  $AGH$  受力包括顶板载荷  $Q_2$ 、煤体自重  $w_2$ 、支护阻力  $F_2$  以及层间作用力.求得  $AG$  面和  $GH$  面不发生剪切破坏的临界支护阻力  $F_{2-1}, F_{2-2}$  为

$$\left. \begin{aligned} F_{2-1} &= \frac{Q_2 \sin \alpha + w_2 \sin \alpha + Q_2 \cos \alpha \tan \varphi_w - L_3 c_w}{\sin \alpha \tan \varphi_w - \cos \alpha}, \\ F_{2-2} &= \frac{(Q_2 + w_2) \cos \alpha - (Q_2 + w_2) \sin \alpha \tan \varphi_0 - c_0 L_4}{\cos \alpha \tan \varphi_0 + \sin \alpha}. \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

式中  $L_3, L_4$  分别为  $AG, GH$  长度. 为保证块体  $AGH$  不垮落,临界支护阻力应取  $F_{2-1}, F_{2-2}$  中最大值,如式(10)所示:

$$F_2 = \max \{ F_{2-1}, F_{2-2} \}. \tag{10}$$

由式(8)和式(10)可确定三角煤不发生垮落所需要施加的最小支护载荷.

### 3.3 异形断面耦合支护设计

数值分析及理论分析可知,异形巷道在顶板帮邻近顶板段及坡顶煤受剪切破坏较为严重,围岩应力及破坏形式表现出明显的非对称破坏特征. 因此,该部分煤体的稳定性对保持巷道整体稳定性至关重要. 本节采用数值分析方法模拟耦合支护过程<sup>[1]</sup>,模拟围岩条件与 2.1 节相同. 为监测支护效果,分别在顶板帮、底板帮、顶板及坡顶煤处设置监测点,记录支护前后位移变化情况. 图 6 为支护前围岩位移分布云图,锚杆支护设计断面如图 7 所示,支护前后位移变化规律如表 4 所示.

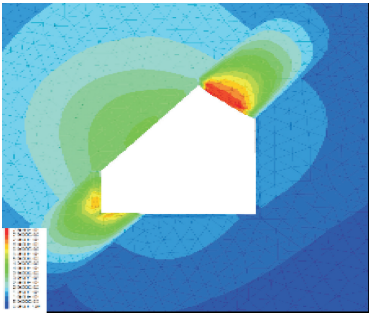


图 6 支护前位移分布云图  
Fig. 6 Displace distribution before support

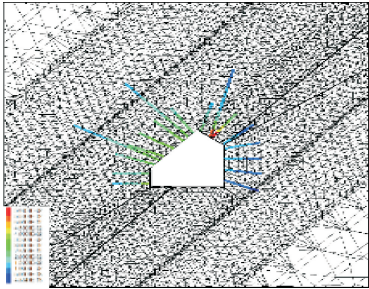


图 7 锚杆支护设计断面图  
Fig. 7 Section of bolt support

由图 6 和表 4 可以看出,支护前顶板帮及坡顶煤变形量最大,顶板变形量次之,底板帮为完整岩体,变形量最小.

根据前面数值分析及理论分析结果,参照已

有支护方案,确定异形巷道支护方式及支护参数.顶板帮、顶板及坡顶煤体采用“锚网 + 钢带 + 锚索”支护,锚杆长度 2.2 m,间排距 0.8 m,预应力 90 kN,锚索长 6 m,端头锚固,预应力 200 kN;底板帮采用“锚网 + 钢带”支护,锚杆长度 2 m,间排距 0.8 m,端头锚固,施加预应力 60 kN,锚杆布置如图 7 所示.

表 4 不同部位位移变化对比				
Table 4 Displacement changes at different positions				
变化情况	顶板帮	底板帮	顶板	坡顶煤
支护前/cm	5.92	1.39	2.42	5.73
支护后/cm	1.31	0.58	0.65	1.89
变化率/%	78	58	73	67

由表 4 可以看出,通过对顶板帮、坡顶煤体及顶板进行加强支护,围岩变形量明显减少.其中,顶板帮移近量减少 78%,坡顶煤下沉量减少 67%,顶板下沉量减少 73%,该支护方式对控制围岩变形效果明显.

## 4 结 论

- 1) 大倾角煤层回采巷道断面形状影响巷道围岩塑性区分布及变形量大小.巷道围岩塑性区沿煤层倾斜方向发展范围较大,顶底板破坏深度大于两帮破坏深度;帮脚处近似处于三向应力状态,抗压强度大,出现压应力集中,破坏程度小.
- 2) 拱形巷道围岩适应性较好,但是考虑巷道施工难度、巷道服务年限和工作面采运衔接等问题,异形断面是大倾角煤层回采巷道最佳断面形式.
- 3) 受倾角效应影响,巷道围岩表现出明显的非对称破坏特征.通过建立异形巷道围岩破坏失稳状态方程,求得关键部位临界支护阻力  $F_1$  和  $F_2$ .
- 4) 数值分析表明,采用“锚网 + 钢带 + 锚索”的支护形式,加强对顶板帮、坡顶煤及顶板的支护,并施加足够的预应力,可以明显减少巷道围岩变形量,保持巷道的稳定性.

## 参考文献:

[1] 杨科,谢广祥.大倾角煤层回采巷道非对称锚网索支护与

实践[J].地下空间与工程学报,2013,9(4):924-927,933.  
(Yang Ke,Xie Guang-xiang. Study on asymmetrical bolting support of retreatting entry in large dip coal seam and its practice[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2013,9(4):924-927,933.)

[2] 王启耀,蒋臻蔚,杨林德.层状岩体巷道弯曲变形的有限元模拟[J].岩土力学,2006,27(7):1101-1104.  
(Wang Qi-yao, Jiang Zhen-wei, Yang Lin-de. Numerical modeling of flexural deformation of laneway in layered rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics,2006,27(7):1101-1104.)

[3] Ramón A F,CelestinoOrdóñez S C,Javier R P. Measurement planning for circular cross-section tunnels using terrestrial laser scanning [J]. Automation in Construction, 2013, 31 (5):1-9.

[4] RavandiE G,Rahmannejad R. Wall displacement prediction of circular,D shaped and modified horseshoe tunnels in non-hydrostatic stress fields [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013,34(2):54-60.

[5] Lu A Z,Chen H Y,Qin Y,et al. Shape optimisation of the support section of a tunnel at great depths [J]. Computers and Geotechnics, 2014,61(9):190-197.

[6] Li X F,Cheng G H,Li X Q,et al. A study of soft rock roadway coupling support in Xiajing Coal Mine [J]. Procedia Engineering,2014,84(5):812-817.

[7] Xiao T Q,Wang X Y,Zhang Z G. Stability control of surrounding rocks for a coal roadway in a deep tectonic region [J]. International Journal of Mining Science and Technology,2014,24(2):171-176.

[8] Gao F Q,Stead D,Kang H P. Simulation of roof shear failure in coal mine roadways using an innovative UDEC trigon approach[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 61 (9): 33-41.

[9] Lu Y,Liu C Y. Similarity simulation of bolt support in a coal roadway in a tectonic stress field [J]. Mining Science and Technology (China),2010,20(9):718-722.

[10] Hart R,Cundall P A,Lemos J. Formulation of a three-dimensional distinct element model—part II: mechanical calculations for motion and interaction of a system composed of many polyhedral blocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1988,25(3):117-125.

[11] 王泳嘉,邢纪波.离散元法及其在岩土工程中的应用[M].沈阳:东北大学出版社,1993.  
(Wang Yong-jia,Xing Ji-bo. Discrete element method and its application in geotechnical engineering [M]. Shenyang: Northeastern University Press,1993.)

[12] 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.  
(Gou Pan-feng, Wei Si-jiang, Zhang Sheng. Numerical simulation of effect of horizontal stresses at different levels on stability of roadways [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2010,27(2):143-148.)