



移动扫码阅读

谷长宛,王 波,王 军,等.基于胀锁式对穿锚索的沿空掘巷窄煤柱双向加固机理研究[J].煤炭科学技术, 2022,50(4):106-116.

GU Changwan, WANG Bo, WANG Jun, *et al.* Research on bidirectional-reinforcement mechanism of narrow coal pillar of gob-side entry driving based on inflatable lock-type anchor[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(4):106-116.

## 基于胀锁式对穿锚索的沿空掘巷窄煤柱 双向加固机理研究

谷长宛<sup>1</sup>,王 波<sup>1</sup>,王 军<sup>2</sup>,陆长亮<sup>1</sup>

(1.华北科技学院 应急技术与管理学院,北京 101601;2.山东建筑大学 土木工程学院,山东 济南 250100)

**摘 要:**基于胀锁式对穿锚索的沿空掘巷窄煤柱双向加固技术是一种针对沿空掘巷留设煤柱支护的新型技术,为进一步研究胀锁式对穿锚索加固机理及优化支护方案,以济宁三号煤矿 123<sub>下</sub>04 工作面沿空掘巷留设煤柱为工程背景,结合室内试验和现场工业试验的相关结论,采用 FLAC<sup>3D</sup> 数值计算软件,分析了对锚固单元中煤体内部破裂特征及其演化过程和胀锁式对穿锚索荷载特征、不同加固方式下窄煤柱变形量变化规律及应力分布变化规律和胀锁式对穿锚索受力变化规律。结果表明:胀锁式对穿锚索可以有效控制窄煤柱变形;由锚索预应力产生的压应力区呈对称分布;锚固体内部产生了共轭剪切破坏带,且共轭剪切带与水平面夹角约为 45°;锚索轴向荷载具有显著阶段特征;峰前阶段,锚索轴力基本稳定;峰后阶段,锚索轴力显著增大,且杆体中部载荷大于两端;锚索采用间排距在 0.8 m×1.0 m~1.5 m×1.0 m 的双排布置方式较为合理。研究成果可为完善胀锁式对穿锚索沿空掘巷窄煤柱双向加固理论和进一步推广该技术提供有力支撑。

**关键词:**胀锁式对穿锚索;沿空掘巷;窄煤柱;双向加固

**中图分类号:**TD353 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2022)04-0106-11

## Research on bidirectional-reinforcement mechanism of narrow coal pillar of gob-side entry driving based on inflatable lock-type anchor

GU Changwan<sup>1</sup>, WANG Bo<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>2</sup>, LU Changliang<sup>1</sup>

(1.School of Emergency Technology and Management, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China;

2.School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250100, China)

**Abstract:** The bidirectional-reinforcement technology for narrow coal pillars in gob-side entry driving based on inflatable lock-type anchor is a new technology for retaining coal pillar support in gob-side roadway. In order to further study the reinforcement mechanism and optimize the support scheme of inflatable lock-type anchor, the coal pillar set in the gob-side entry driving of 04 working face under 123 coal seam in the Jining No.3 Coal Mine was taken as the engineering background, combined with the relevant conclusions of laboratory experiments and field industrial test, the FLAC<sup>3D</sup> numerical calculation software was applied to analyze the internal rupture characteristics and evolution process of coal body and load characteristics of inflatable lock-type anchor of the anchoring unit, the law of narrow coal pillar deformation and stress distribution and force of inflatable lock-type anchor of different reinforcement methods. The results show that the deformation of narrow coal pillar can be effectively controlled by inflatable lock-type anchor. The compressive stress area generated by the prestress of the anchor cable is symmetrically distributed. The conjugate shear failure zone is generated inside the anchor, and the angle between the conjugate shear band and the horizontal plane is about 45°. The distribution of axial load of cable has significant characteristics of stages. In the pre-peak stage, the axial force of the anchor cable is basically stable. In the post-peak stage, the axial force of the

**收稿日期:**2021-10-02 **责任编辑:**常 琛 **DOI:**10.13199/j.cnki.cst.2019-1409

**基金项目:**河北省自然科学基金资助项目(E2019508088);国家自然科学基金资助项目(51574124);中央高校基本科研业务费资助项目(3142018034)

**作者简介:**谷长宛(1992—),男,河北威县人,硕士研究生。E-mail:1073377193@qq.com

**通讯作者:**王 波(1981—),男,山东阳谷人,教授,硕士生导师。E-mail:wangbo.94@163.com

anchor cable increased significantly, and the load in the middle of the rod is larger than that at both ends. It is more reasonable for the anchor cables to adopt a double-row arrangement with a row spacing between  $0.8 \times 1.0$  m and  $1.5 \times 1.0$  m. The research results can provide strong support for perfecting the theory of two-way reinforcement of narrow coal pillars in gob-gob roadway excavation and further popularizing the technology.

**Key words:** inflatable lock-type anchor; gob-side entry driving; narrow coal pillar; bidirectional-reinforcement mechanism

## 0 引言

沿空掘巷窄煤柱是沿空掘巷采矿活动中为隔绝采空区而留设的煤体,其完整性和稳定性有着至关重要的现实意义<sup>[1]</sup>。针对沿空掘巷窄煤柱难以有效加固的问题,提出了胀锁式对穿锚索沿空掘巷窄煤柱双向加固技术,现场工业试验表明,该技术能够有效维护窄煤柱完整性和稳定性<sup>[2-6]</sup>。为进一步完善该技术,有必要对其加固机理进行深入研究。

目前,众多专家、学者运用多种理论方法和研究手段对巷道锚杆、锚索支护的力学特征和破坏特征做了大量研究。姚强岭等<sup>[7]</sup>基于伺服液压控制卧式锚杆拉拔试验平台,研究螺纹钢锚杆不同锚固长度条件下锚固段剪应力和轴力沿锚固底部方向的变化规律。王其洲等<sup>[8]</sup>采用实验室相似模拟试验方法,研究了不同锚杆间排距和预紧力条件下的锚固体载荷演化规律及再破坏特征。孟庆彬等<sup>[9]</sup>提出了“锚注加固体等效层”概念,采用FLAC<sup>3D</sup>数值模拟研究了深部软岩巷道锚注支护机理,揭示了“锚注加固体等效层”厚度、弹性模量、黏聚力、内摩擦角对巷道围岩位移及塑性区的影响规律。刘永权等<sup>[10]</sup>在对锚索锚固段剪应力分布模式进行弹塑性理论分析的基础上,开展了拉力集中型、拉力分散型、压力分散型锚索的现场破坏性试验,对3类锚索的剪应力分布特征、承载能力、荷载-位移曲线进行了对比分析。赵一鸣<sup>[11]</sup>建立了考虑树脂锚固层黏弹特性的锚固体拉拔状态下的长时蠕变力学模型。孟波等<sup>[12-13]</sup>利用真三轴物理模拟试验系统,研究了破裂围岩锚固体以及锚杆的变形破坏特征。康红普等<sup>[14-15]</sup>运用室内模型和FLAC<sup>3D</sup>数值模型分析了2根锚杆形成的支护应力场相互叠加与影响的特点及黏结刚度对层状顶板锚杆支护效用的影响。侯朝炯等<sup>[16]</sup>研究表明,岩石峰后强度特征对锚杆作用敏感性较高,即锚杆的支护和加固作用对峰后岩体的止损效果突出。丁书学等<sup>[17]</sup>研究了含软弱夹层锚固体中的锚杆受力演化规律和沿杆体轴向的分布规律。李东印等<sup>[18]</sup>分析了锚杆树脂破坏面的演化特征,以及螺纹钢横肋面角、径向尺寸系数和横肋间距对锚固体破坏特征的影响。韦四江等<sup>[19-20]</sup>探讨巷

道围岩不同侧压系数条件下锚固承载结构变形破坏过程和锚杆端部工作阻力变化规律,以及预应力锚杆作用下锚固体的形成因素和失稳规律。综上所述,众多学者对不同影响因素下锚杆对锚固体的锚固作用进行了相当充分的研究,且取得了突出的研究成果,但对锚固体内部破裂特征及演化过程,锚杆、锚索杆体力学特性,以及两者之间关系的研究尚显不足。

针对上述问题,笔者结合室内试验和现场工业试验的相关结论,应用FLAC<sup>3D</sup>数值计算软件,对煤体内部破裂特征及其演化过程和锚索荷载特征、窄煤柱变形量变化规律及应力分布变化规律和锚索受力变化规律进行研究,并得到了相应的研究成果。研究成果可为完善胀锁式对穿锚索沿空掘巷窄煤柱双向加固理论和进一步推广该技术提供有力支撑。

## 1 胀锁式对穿锚索双向加固技术及现场工业性试验

### 1.1 胀锁式对穿锚索双向加固技术

#### 1.1.1 胀锁式对穿锚索结构

如图1所示,胀锁式对穿锚索主要由胀锁体、注浆管和锚索体3部分构成,其中胀锁体分为锁具、注浆囊袋和单向阀等部分。注浆囊袋使用前折叠收起,如图1中A所示,通过注浆管注入水泥浆后囊袋胀起,水泥浆液固化后形成胀锁体,如图1中B所示,水泥浆凝固时间可根据需要进行调控。胀锁体长度为450~500 mm,形成的水泥体直径为350~400 mm,胀锁体具体尺寸可根据实际工况进行调整。室内拉拔试验表明,成型后的胀锁式对穿锚索可提供不小于430 kN的锚固力,其失效形式主要表现为水泥体的破坏和锚索脱离水泥体,锚索未发生破断。

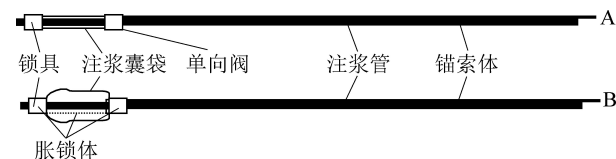


图1 胀锁式对穿锚索整体结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of overall structure of inflatable lock-type anchor

### 1.1.2 胀锁式对穿锚索加固机理

胀锁式对穿锚索沿空掘巷窄煤柱双向加固技术可在煤柱另一侧为采空区的情况下,在巷道侧进行施工,实现对煤柱的双向加固,其解决了传统加固方法无法实现单侧施工双向加固煤柱的难题。胀锁式对穿锚索的结构可以充分发挥锚索钢绞线高抗拉强度的特性,并在采空区侧胀锁头和施工侧托盘锁具的配合下,主动给窄煤柱的两个自由面提供较大的压力,使煤柱受力更加科学,从而有效控制煤柱变形,提高煤柱稳定性。胀锁式对穿锚索加固结构如图2所示。

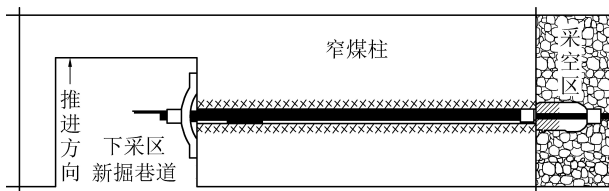


图2 胀锁式对穿锚索加固示意

Fig.2 Support schematic of inflatable lock-type anchor

胀锁式对穿锚索施工工艺如下:①在巷道侧向煤柱打穿透钻孔;②将胀锁式对穿锚索插入钻孔;③采用发泡剂进行预封孔;④采用注浆泵通过注浆管向注浆囊袋内注水泥浆;⑤施加预应力;⑥采用水泥浆终封孔。

### 1.2 现场工业性试验

济宁三号煤矿 123<sub>F</sub>04 工作面标高-617.7~-687.6 m,平均标高-655.0 m,地面标高+34.17~+35.02 m,平均标高+34.53 m,工作面平均埋深689.53 m,走向长度约1 900 m,煤厚度1.5~7.5 m,平均厚度5.34 m,煤层倾角最大13°,一般约为4°,采用走向长壁综采放顶煤采煤法,采煤高度3.2~3.8 m,采放比1:0.5,采用全部垮落法管理顶板。123<sub>F</sub>04 工作面沿123<sub>F</sub>03 采空区侧巷道作为运输巷,与123<sub>F</sub>03 运输巷之间留设3.5 m宽净煤柱。工作面巷道位置关系如图3所示。

实际生产过程中,随着本工作面的推进,原有的锚-网-索配合单体液压支柱支护方式无法起到有效的锚固效果,导致煤柱失稳变形,进而导致巷道大变形。胀锁式对穿锚索优化了传统锚索的加固方式,可为煤柱提供双向加固力,从而提高煤柱的稳定性。因此,矿方领导决定在原有支护的基础上增加胀锁式对穿锚索对窄煤柱进行加强支护。

图4为现场工业性试验巷道围岩表面位移随采面推进变化图。试验过程中的巷道围岩变形采用十字布点法进行监测,数据表明,使用胀锁式对穿锚索

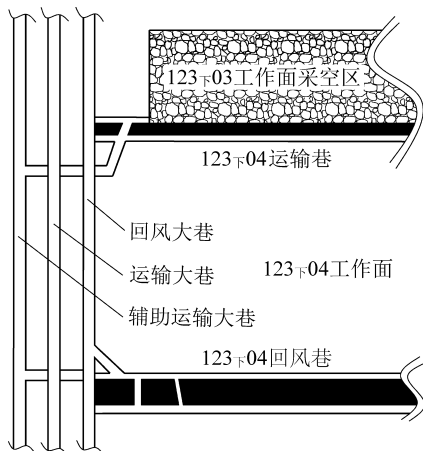


图3 巷道布置示意

Fig.3 Layout schematic of roadway

后巷道的围岩变形有了很大程度的降低,其中巷道顶板下沉量和窄煤柱鼓帮量分别由1 400 mm和1 500 mm降低到420 mm左右,变形量降低70%以上,加固效果明显。

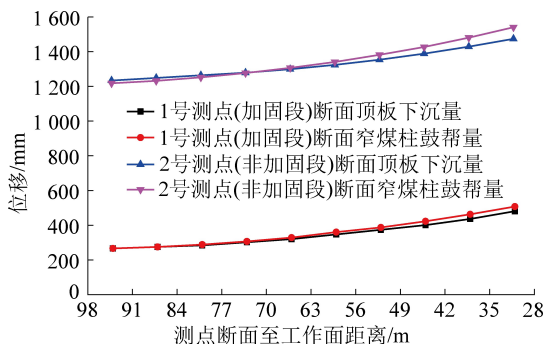


图4 巷道围岩位移

Fig.4 Displacement of surrounding rock

## 2 单轴压缩数值模拟

### 2.1 煤体力学参数

将济宁三号煤矿 123<sub>F</sub>04 工作面胶带运输巷煤样加工成高100 mm、直径50 mm的标准圆柱试件,在华北科技学院 RMT 试验平台进行单轴压缩试验,试验采用位移加载方式,加载速率为 $2 \times 10^{-3}$  mm/s,得到煤体相关力学参数和破坏特征。煤体力学参数见表1。

表1 煤体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of coal

采样深度/m	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	内摩擦角/( $^{\circ}$ )	黏聚力/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
690	1 450	17.80	1.00	30	1.50	1.64	0.24



## 2.2 力学参数校验

通过 FLAC<sup>3D</sup> 数值计算软件建立标准煤体试件单轴压缩试验数值模型,如图 5a 所示,在模型端面施加加载速率为  $2\times 10^{-3}$  mm/step 的加载条件,加载示意如图 5b 所示,数值模型的塑性剪应变与强度参数对应关系见表 2。数值模型采用应变软化准则。

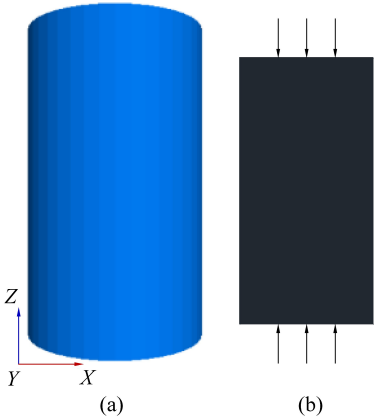


图 5 单轴压缩试验数值模型

Fig.5 Numerical model of uniaxial compression numerical

表 2 数值模型强度参数

Table 2 Strength parameters of numerical model

塑性应变/ $10^{-2}$	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	剪胀角/ ( $^{\circ}$ )
0	1.50	30	10
0.05	7.50	27	3
0.10	3.75	25	0
1.00	3.75	25	0

如图 6 所示,2 种方法下试件均以压剪破坏为主,且破裂方式和裂隙特征近似。在模拟初期,试件表面出现局部的剪力集中,如图 6a 所示,实验室单轴压缩初期,试件表面出现细小的倾斜裂隙。试件破坏时,数值模拟模型表面出现与水平线角度大致为  $55^{\circ}$  的剪力集中区域和两端的应力集中区域,这说明试件的最终破坏状态为剪切破坏,且破坏裂隙的角度大致为  $55^{\circ}$ ,如图 6b 和 6c 所示;实验室单轴压缩试验结果表明,试件破坏为剪切破坏,且破坏裂隙为倾斜裂隙,受煤体内部结构的影响,破坏裂隙角度仅在试件上端部大致呈  $50^{\circ}$ ,试件中、下部破坏裂隙角度则向垂直方向有所倾斜,试件下端部也出现了较多的倾斜裂隙,且部分试件脱落,如图 6d 所示。

由图 7 可知,实验室单轴压缩和数值模拟的应力-应变曲线趋势大致一致,主要分为峰前和峰后 2 大阶段,2 个阶段的分界点为应力峰值位置,即应变

达到  $6.8\times 10^{-3}$  时。其中峰前阶段包括初期阶段 ( $0\sim 3\times 10^{-3}$ ) 和加速变形阶段 ( $3\times 10^{-3}\sim 6.8\times 10^{-3}$ ) 两部分,峰后阶段包括软化阶段 ( $6.8\times 10^{-3}\sim 13\times 10^{-3}$ ) 和破坏阶段 ( $>13\times 10^{-3}$ ) 2 部分。峰前阶段应力-应变曲线表现为迅速提升,峰后阶段应力-应变曲线则表现为曲折往复下降,并在轴向应变达到  $14\times 10^{-3}$  附近迅速下降。实验室单轴压缩试件峰值强度为 17.8 MPa,较数值模拟模型峰值强度大了 0.41 MPa,两者相对误差 2.3%;实验室单轴试件残余强度为 12.46 MPa,数值模拟模型残余强度为 13.27 MPa,两者相对误差为 6.5%。

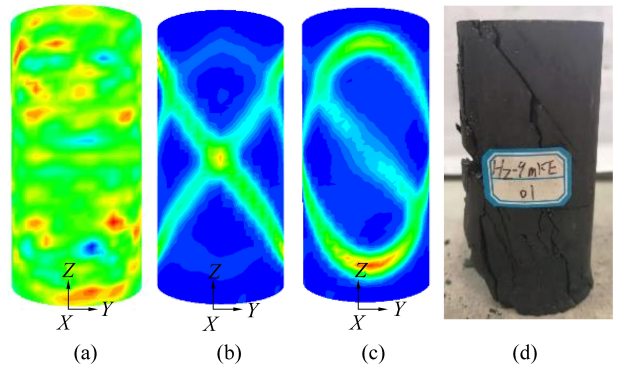


图 6 煤体单轴压缩破坏特征

Fig.6 Test specimen failure characteristics of coal under uniaxial compression

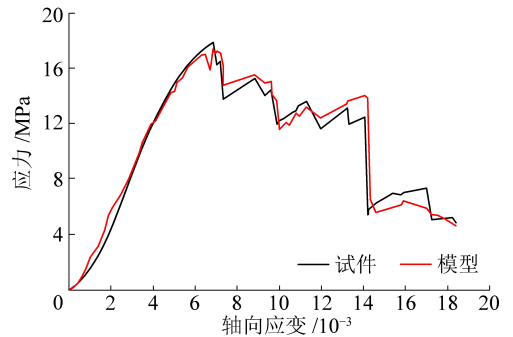


图 7 单轴压缩应力-应变曲线

Fig.7 Stress-strain curve of uniaxial compression

对比实验室单轴压缩试件和数值模型的破坏特征和强度特征可知,虽然 2 种方法得出的结果存在一定差异,但数值模型在一定程度上模拟和揭示了试件在单轴压缩过程中的破坏规律和强度变化规律,说明采用当前力学参数的数值模型能对试件的力学性质和变形特征进行表征。

## 3 锚固体数值模拟

### 3.1 锚固单元模型建立

以济宁三号煤矿 123<sub>F</sub>04 工作面运输巷沿空掘



巷留设煤柱为工程背景,123<sub>下</sub>04工作面沿空巷道截面为净宽5.2 m、净高3.5 m的矩形,净面积18.2 m<sup>2</sup>,与123<sub>下</sub>03运输巷之间留设3.5 m净煤柱。数值模型取边长3.5 m的正方体,其中 $X$ 轴正方向为巷道径向方向, $Y$ 轴正方向为巷道轴向方向, $Z$ 轴正方向为巷道切向方向,巷道侧和采空区侧设置自由面,其中 $x=0$ 面为巷道侧,仅考虑胀锁式对穿锚索支护作用,数值模型如图8所示。在自由面中心垂直自由面安装直径21.6 mm、长为3.5 m的胀锁式对穿锚索,靠近巷道侧1.0 m范围内采用矿用发泡剂封堵钻孔,其余部分采用水泥浆封堵,设定加载速率为 $2 \times 10^{-3}$  mm/step。数值模型采用应变软化准则。

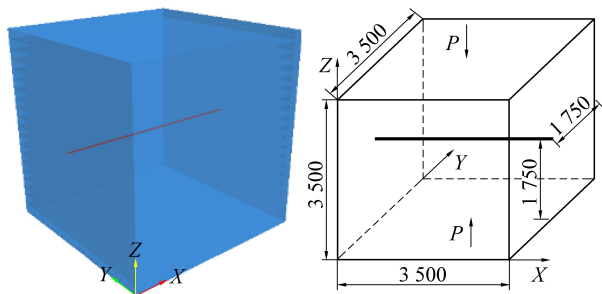


图8 数值模型

Fig.8 Numerical model

### 3.2 胀锁式对穿锚索模型设置

数值模拟中,按照胀锁式对穿锚索地面拉拔实验得到的锚索整体最大拉力430 kN对锚索模型进行赋值,但实际情况下,锚索拉力达到430 kN时未发生破断。为得到准确的数值模拟结果和相应的数据,将胀锁式对穿锚索的数值模型分为端头、水泥浆封堵、发泡剂封堵3个部分,共14段进行监测,并分别对各部分进行赋值、优化。基于相关文献<sup>[11-12]</sup>的模拟方法,其设计过程如下:①在模型垂直自由面中心设置两段锚索;②固定锚索附近1.0 m范围的网格,两端头与煤体采用刚性连接;③开启Cable单元锚索属性,对其抗拉强度等力学参数进行赋值,其中周围水泥浆的属性设置为较小值;④在两段锚索相互靠近端头设置方向相反,大小为160 kN的拉力,运算至平衡;⑤采用新的Cable单元连接两段锚索,移除拉力,运算至平衡;⑥锚索力学参数不变,对其周围水泥浆参数进行重新赋值,靠近巷道侧0~1.0 m为发泡剂封堵区域,其余部分为水泥浆锚固区域;⑦释放锚索附近固定的网格,运算至平衡。锚索布置如图9所示。

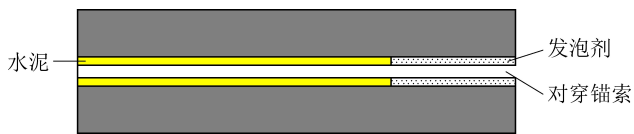


图9 胀锁式对穿锚索布置示意

Fig.9 Layout schematic of the inflatable lock-type anchor

### 3.3 模拟结果及分析

#### 3.3.1 锚索预应力分布

如图10所示,对穿锚索预应力在煤体内部的分布主要集中在靠近锚索端头0~0.5 m内,受钻孔封堵方式的影响,对穿锚索预应力在煤体内的扩散分布未在沿锚索切向呈对称分布,但在沿锚索轴向方向为对称分布。预应力区域的最大值位于靠近对穿锚索端头的位置为0.22 MPa,预应力在0~0.5 m降低迅速;虽然预应力区未表现出完美的椭圆形,但其形状大致为直径0.7 m的圆柱体,并在煤体内部出现突出;在煤体实际围压与锚索预应力的作用下,煤体内部紧靠预应力区位置均出现与预应力区应力相反的区域。整体上,施加预应力后,煤体两侧形成了挤压区域,说明胀锁式对穿锚索可以实现对煤柱的双向加固。

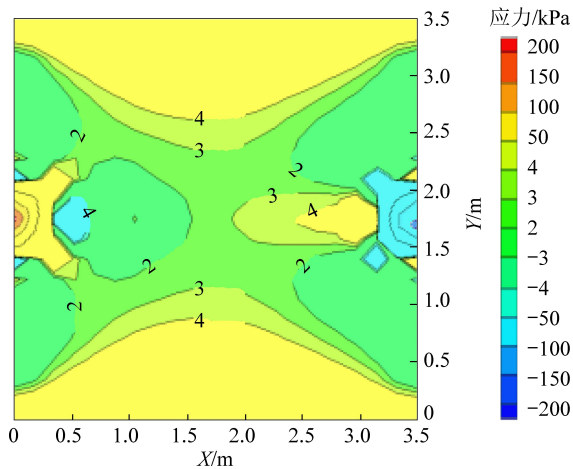


图10 锚索附近区域预应力分布

Fig.10 Prestress distribution diagram of area near inflatable lock-type anchor

#### 3.3.2 模型模拟结果

1)模型内部破裂特征。 $X=0$ 和 $X=3.5$ 平面为煤体模型扩容变形的主要释放面,模型主要剪切变形方向为沿 $X$ 轴方向的径向方向,如图11a所示,以 $Y$ 轴正方向为法向,过煤体中心点的剖面如图11b所示。由图11可知,胀锁式对穿锚索支护下的煤体模型剪切破坏特征趋于对称,模型中部出现2条主破裂带,主破裂带共轭且与水平面夹角约为 $45^\circ$ ,2个自由面上、下端均出现沿轴向的破裂带,这说明煤柱的破

坏主要为剪切破坏,且主要破裂区位于内部,端面则表现为整体脱落。

2)模型内部破裂演化过程。由图 7 可知,加载过程可分为初期阶段、加速变形阶段、软化阶段和破坏阶段 4 个阶段。图 12 为剪应变增量与切向应变关系。加载初期阶段,模型剪应变增量集中在两个自由面的上下端部,胀锁式对穿锚索端头部位也出现剪应变增量集中区域,如图 12a 所示;切向应变不断增加,进入加速变形阶段,该阶段的剪应变增量集中区域逐渐扩展至模型内部,并最终在内部出现较大范围的集中区域,如图 12b 所示;进入软化阶段后,模型内部出现 2 个主要剪应变增量集中区域,随着加载的进行,2 个区域逐渐合并,如图 12c 和 12d 所示;随着加载的进一步进行,模型进入破坏阶段,模型内部剪应变增量集中区域进一步缩小,数值进一步增大,最终形成如图 12e 和 12f 所示的共轭带。

由图 13 可知,模型在峰前阶段(初期阶段和加速变形阶段)的剪应变增量变化幅度不大,当位移加载曲线达到峰值时,其最大值仅为  $1.19\times10^{-3}$ ;进

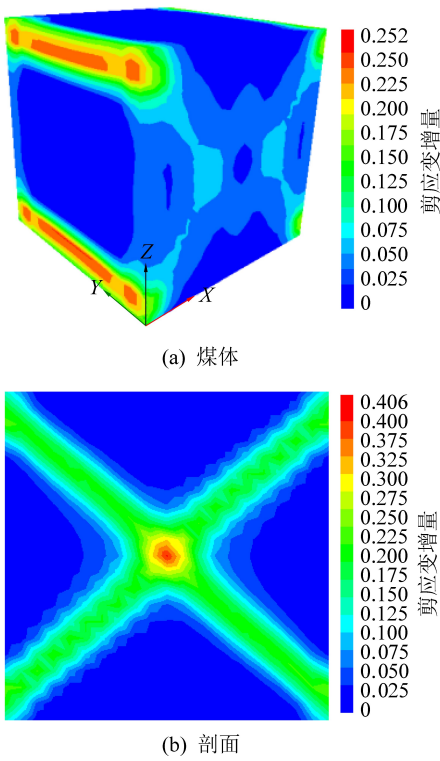


图 11 模型剪应变增量分布特征  
Fig.11 Distribution characteristics of shear strain increment of the model

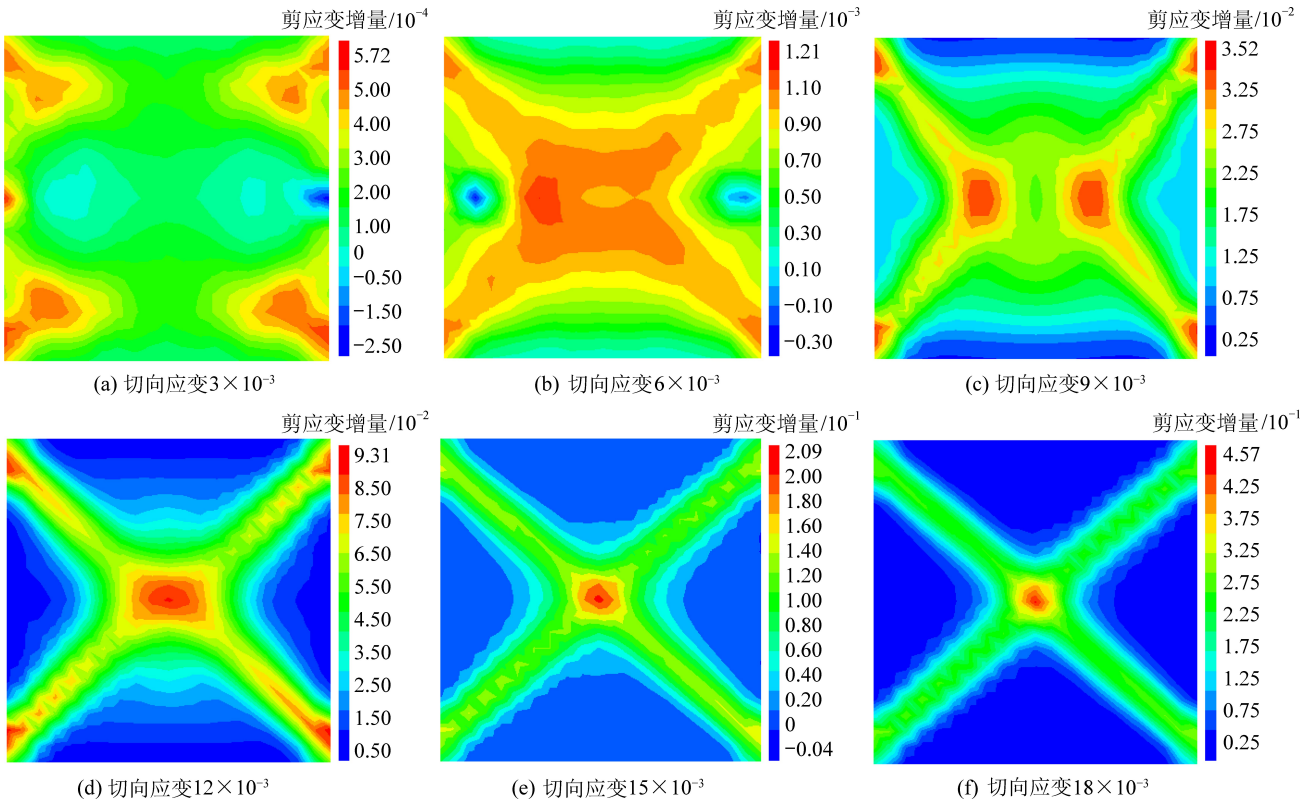


图 12 剪应变增量与切向应变关系  
Fig.12 Relationship between shear strain increment and tangential strain

入峰后阶段(软化阶段和破坏阶段)后,剪应变增量分为 3 个阶段增长,首先是应变为  $6.8\times10^{-3}\sim9.5\times$

$10^{-3}$  范围内,其增长较为缓慢,随后曲线斜率迅速增大,在应变为  $12\times10^{-3}$  附近增速又趋缓;至加载结

束,剪应变增量增长速率变化不大。

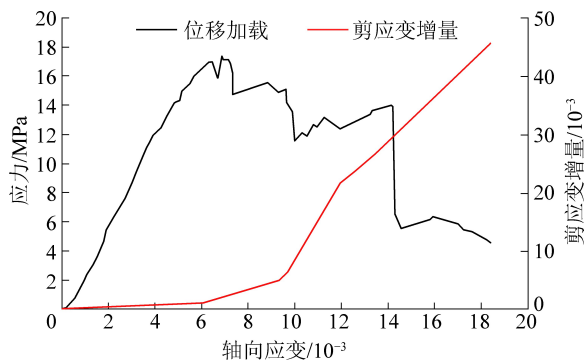


图 13 剪应变增量变化规律

Fig.13 Law of shear strain increment

分析可知,煤柱剪应变增量与其位移加载过程关系密切,当剪应变增量处于一个较低值且增速较小时,加载处在峰前阶段,煤柱尚有较好的承载能力;当剪应变增量开始快速增长时,说明加载进入峰后阶段,此时煤柱开始大变形并逐渐失去承载能力;煤柱的应力峰值一般出现在剪应变增量曲线斜率突变的位置。

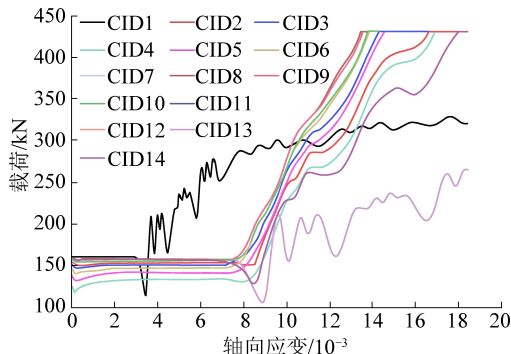
### 3.4 锚索轴力模拟结果

由图 14a 可知(CID1~CID14 为锚索不同位置,由发泡剂封堵侧端头开始编号(CID1),至另一端头止),胀锁式对穿锚索两端头轴力变化规律相似。加载初期阶段,巷道侧锚索端头轴力基本维持在 160 kN;进入加速变形阶段,锚索端头轴力整体呈阶梯状增大,其轴力的提升总共分为 3 个梯度:第 1 梯度为 210 kN,第 2 梯度为 235 kN,第 3 梯度为 275 kN,每个梯度均在一个较小轴力上开始,并在结束时轴力再度小幅度降低,此阶段内,巷道侧锚索端头轴力大于锚索其他部位轴力;进入峰后阶段,锚索端头轴力处于波形增长状态,且增长速率趋缓。采空区侧锚索端头轴力则在峰前阶段较为稳定,维持在 160 kN;其峰后阶段变化趋势与巷道侧锚索端头轴力在加速变形阶段轴力变化趋势类似。两端头的锚索轴力均未达到设定值 430 kN。

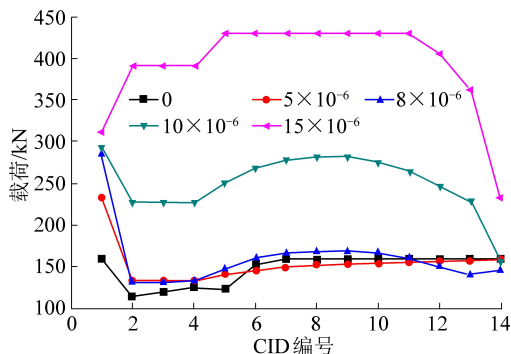
锚索其他部位轴力变化趋势相似,峰前阶段变化不大,进入峰后阶段并滞后应力峰值开始变化,轴力先是稍微降低,且靠近端头的锚索轴力降低幅度稍大,离端头越远降低幅度越小,随后轴力迅速增大;进入破坏阶段,锚索其他部位轴力先后达到设定值,且距锚索端头越近越晚达到设定值,这一趋势在图 14b 中体现地更加明显。

由图 14b 可知,整个加载过程中,锚索轴力呈拱形分布,锚索两端轴力小于内部轴力。发泡剂封堵

区域,除端头位置轴力变化幅度较大外,锚索轴力普遍较小,说明由于发泡剂的存在,锚索仅起到连接的作用;水泥浆锚固区域,受水泥浆的黏结作用,锚索对限制煤体变形起到了较大作用。



(a) 锚索轴力变化过程



(b) 加载特征点对应的锚索体轴力

图 14 锚索轴力分布

Fig.14 Distribution of axial force of inflatable lock-type anchor

因此,在煤柱承载过程中,胀锁式对穿锚索的稳定施力部分位于中部,轴力变化规律具有显著阶段性特征,并与煤体径向剪切扩容变形和外部荷载状态密切相关,即煤体由峰前阶段加载至峰后阶段后,锚索逐渐开始发挥作用,两端头的受力则在随着煤体变形的过程中更加复杂。

## 4 不同加固方案数值模拟

### 4.1 模拟方案

模型为长×宽×高=10 m×3.5 m×3.5 m 的长方体,模型与胀锁式对穿锚索的相对位置及参数与第 2 节一致,设定加载速率为  $2 \times 10^{-3}$  mm/step。数值模型采用应变软化准则。

模拟方案设计如下:无支护模型;单排大间距模型,在模型横向中心位置装入 5 根锚索,间距 1.5 m;单排小间距模型,在模型横向中心装入 10 根锚索,间距 0.8 m;双排大间距模型,在模型中部装入 2 排共 10 根锚索,间排距 1.5 m×1.0 m;双排小间距模型,在模型上装入 2 排共 20 根锚索,间排距 0.8 m×



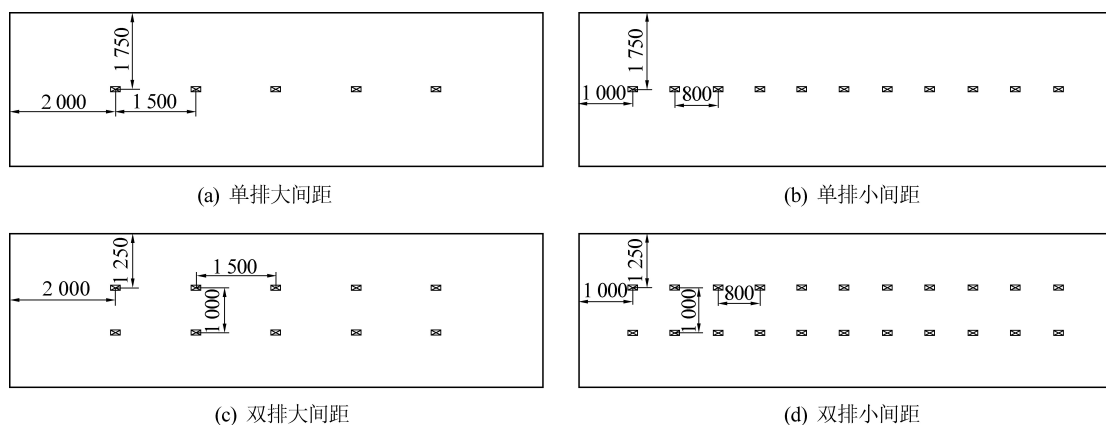


图 15 对穿锚索布置

Fig.15 Layout of inflatable lock-type anchor

1.0 m。对穿锚索布置如图 15 所示。

## 4.2 模拟结果及分析

### 4.2.1 位移模拟结果

为有效评估不同支护方式下胀锁式对穿锚索对模型的支护效果及锚索自身应力分布情况,将模型运行至相同步数进行对比,得到不同支护方式下  $X$  方向的位移量,如图 16 所示。

由图 16 可知,模型在  $X$  方向的位移主要集中在

模型中部且距自由面 1.0 m 的范围内,这说明在实际生产过程中,窄煤柱巷道侧和采空区侧表面将会产生较大的变形,这与现场窄煤柱片帮严重的现象一致。另外胀锁式对穿锚索的使用在不同程度上改变了窄煤柱的变形量和变形区域,且小间排距布置方式的支护效果优于大间排距布置方式,双排布置方式的支护效果优于单排布置方式,锚索数量相同的情况下,较小的间排距更能有效抑制窄煤柱的变形。

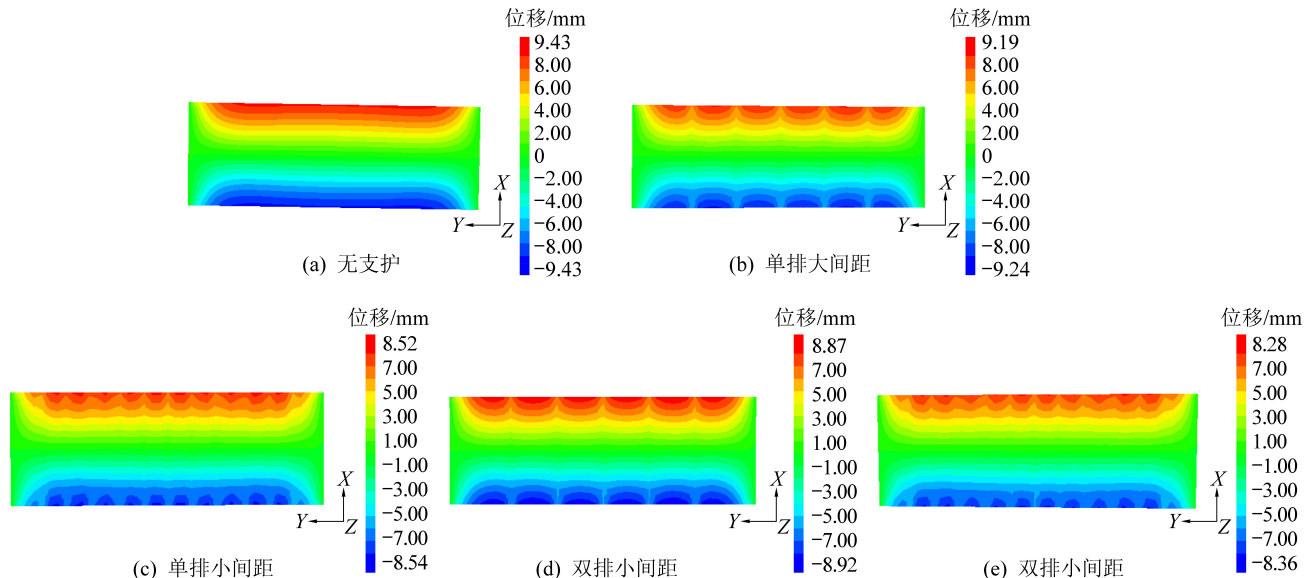


图 16 不同加固方式下模型位移

Fig.16 Displacements of the models under different reinforcement methods

### 4.2.2 应力模拟结果

在  $Y=5.0$  m 处提取应力云图,如图 17 所示。无支护模型内部有较大的拉应力区存在,如图 17a 所示,随着胀锁式对穿锚索的施加及锚索排数的增加和间排距的减小,模型内部拉应力区域在明显减少;由图 17b、17c、17d 可知,从减少模型拉应力区域的效果来看,小间排距布置方式的支护效果优于大

间排距布置方式,双排布置方式优于单排布置方式,锚索数量相同时,双排布置方式优于单排布置方式。由图 17e 可知,随着锚索间排距的不断增大,其减少窄煤柱模型内部拉应力区域的效果较双排大间距布置方式有所提升,但拉压应力的数值却有增大的趋势,这说明胀锁式对穿锚索的大量使用在控制窄煤柱变形的情况下,也会在一定程度上破坏窄煤柱的完整性。

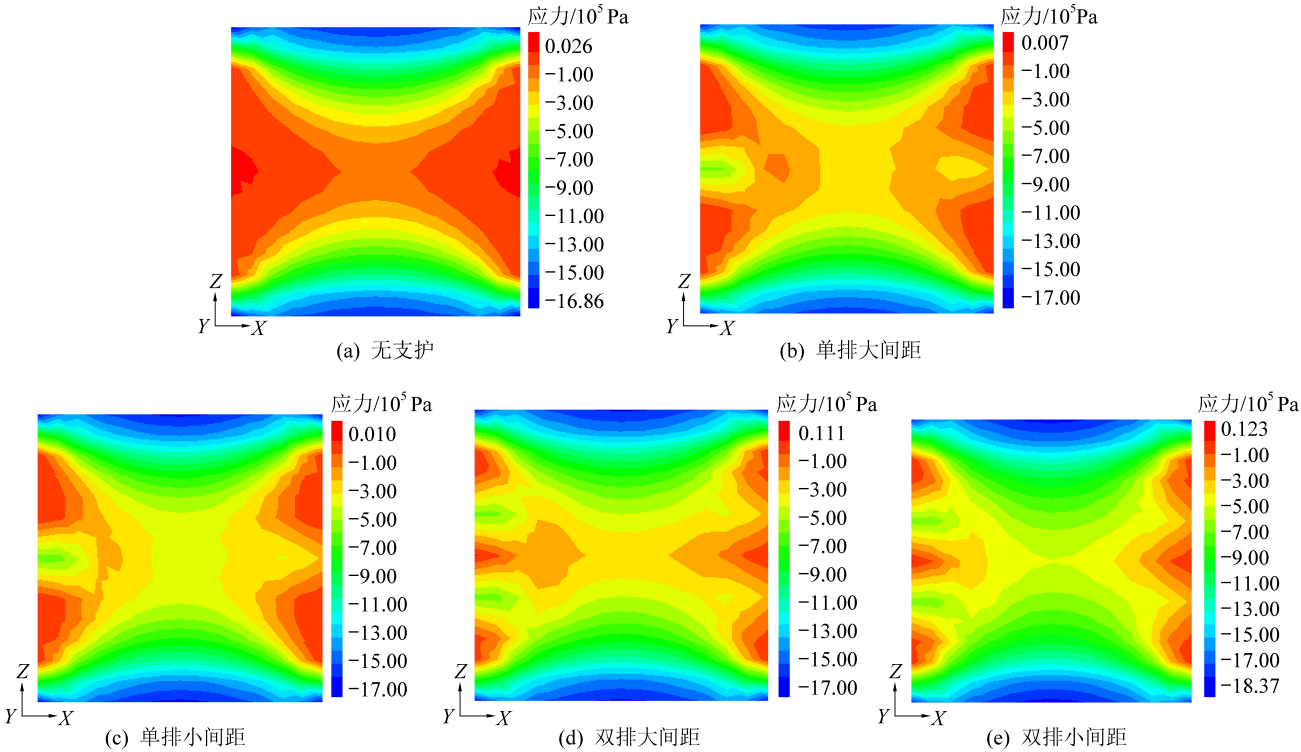


图 17 不同加固方式下模型应力

Fig.17 Stress diagram of model under different reinforcement modes

4.2.3 锚索轴力模拟结果

在加固窄煤柱过程中,锚索的受力主要集中在锚索中部,锚索两端受力较小,这与 3.4 节中的结果一致,且在整个模拟过程中锚索受力均未达到设定的最大值,这说明在实际使用胀锁式对

穿锚索加固窄煤柱时,锚索不会因受力过大而发生破断。锚索的受力情况与锚索布置的间排距有关,且双排布置方式可以有效缓解锚索的受力情况。不同锚索布置情况下锚索轴力模拟效果如图 18 所示。

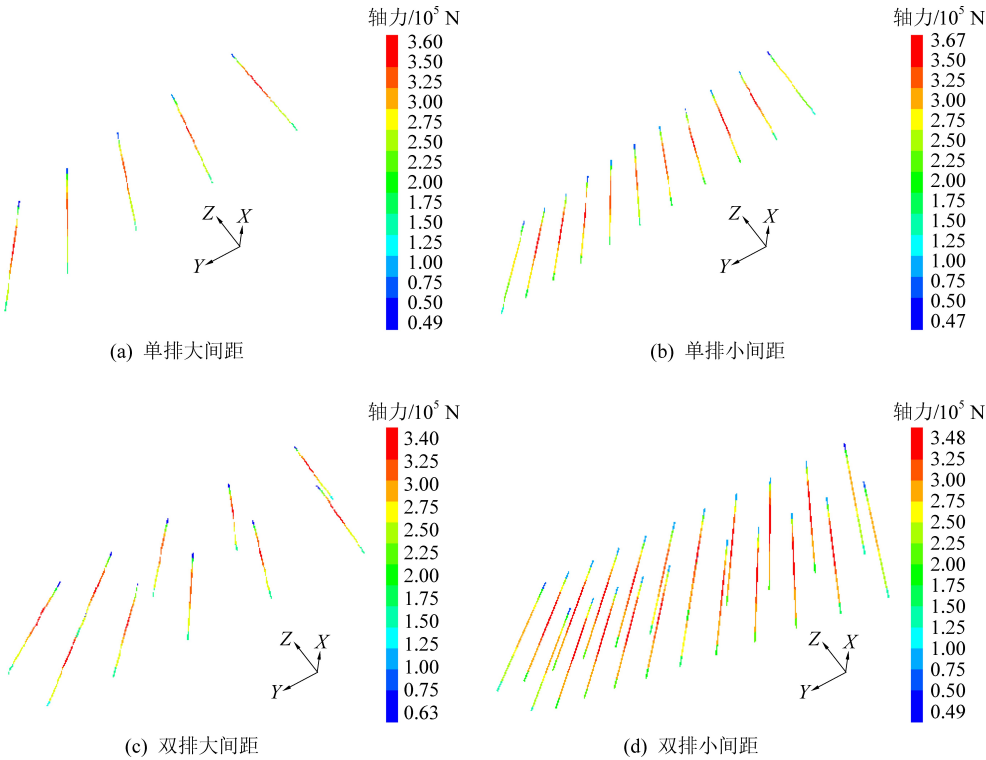


图 18 不同加固方式下锚索轴力

Fig.18 Axial force of inflatable lock-type anchor under different reinforcement methods

综上所述,胀锁式对穿锚索能在一定程度上加固窄煤柱,小间排距布置方式的支护效果优于大间排距布置方式,双排布置方式优于单排布置方式,因此在实际生产中采用双排布置方式,且间排距介于 $0.8\text{ m}\times 1.0\text{ m}\sim 1.5\text{ m}\times 1.0\text{ m}$ 较合理,间排距可根据实际情况进行适当的调整。

## 5 结 论

1) 胀锁式对穿锚索沿空掘巷窄煤柱双向加固技术解决了传统加固方法无法实现单侧施工双向加固煤柱的难题,使煤柱受力更加科学,从而有效控制煤柱变形,提高煤柱稳定性。现场工业性试验表明,其能够有效控制沿空掘巷留设窄煤柱的变形量,并通过限制窄煤柱的失稳变形来达到限制巷道失稳变形的目的。

2) 通过FLAC<sup>3D</sup>数值模拟软件模拟了胀锁式对穿锚索及其加固作用下的煤体,得到了锚索预应力在煤体内部产生的压应力分布区域和煤体锚固单元内部破坏特征及其演化过程;胀锁式对穿锚索轴力则表现为:峰前阶段,锚索轴力未明显变化;峰后阶段,锚索轴力开始增加;锚索周围的封堵材料性质会影响锚索体内部轴力的分布。

3) 从控制变形和减小应力区域方面,胀锁式对穿锚索小间排距布置方式的支护效果优于大间排距布置方式,双排布置方式的支护效果优于单排布置方式。综合分析可知,采用间排距介于 $0.8\text{ m}\times 1.0\text{ m}\sim 1.5\text{ m}\times 1.0\text{ m}$ 的双排布置方式较为合理,其间排距可根据实际情况进行适当的调整。

## 参考文献(References):

- [1] 姜耀东,宋红华,马振乾,等.基于地应力反演的构造应力区沿空巷道窄煤柱宽度优化研究[J].煤炭学报,2018,43(2):319-326.  
JIANG Yaodong, SONG Honghua, MA Zhenqian, *et al.* Optimization research on the width of narrow coal pillar along goaf tunnel in tectonic stress zone[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2):319-326.
- [2] 邢天海,王 军,王 波,等.胀锁式对穿锚索窄煤柱加固技术开发及应用[J].煤炭技术,2018,37(11):27-29.  
XING Tianhai, WANG Jun, WANG Bo, *et al.* Development and application of swing-lock reinforcement technology for narrow coal pillar[J]. Coal Technology, 2018, 37(11):27-29.
- [3] 邢天海,王 波,王 军,等.深部厚煤层沿空掘巷留设煤柱加固试验研究[J].煤炭技术,2019,38(1):33-36.  
XING Tianhai, WANG Bo, WANG Jun, *et al.* Experimental study on reinforcement of coal pillar in driving roadway along goaf in deep thick coal seam[J]. Coal Technology, 2019, 38(1):33-36.
- [4] 康红普.煤矿巷道支护与加固材料的发展及展望[J].煤炭科学

技术,2021,49(4):1-11.

KANG Hongpu. Development and prospects of support and reinforcement materials for coal mine roadways[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(4):1-11.

- [5] 彭林军,宋振骐,周光华,等.大采高综放动压巷道窄煤柱沿空掘巷围岩控制[J].煤炭科学技术,2021,49(10):34-43.  
PENG Linjun, SONG Zhenqi, ZHOU Guanghua, *et al.* Application study of narrow coal pillars along the goaf in large mining height fully mechanized top coal caving roadway[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(10):34-43.
- [6] 孟祥军. 基于基本顶断裂位置的综放沿空掘巷煤帮支护技术[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1):61-68.  
MENG Xiangjun. Solid coal rib support technology of fully-mechanized mining along gob-side entry driving based on main roof fracture location[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1):61-68.
- [7] 姚强岭,王伟男,孟国胜,等.树脂锚杆不同锚固长度锚固段受力特征试验研究[J].采矿与安全工程学报,2019,36(4):643-649.  
YAO Qiangling, WANG Weinan, MENG Guosheng, *et al.* Experimental study on mechanical characteristics of resin bolt anchoring section with different anchorage lengths[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2019, 36(4):643-649.
- [8] 王其洲,叶海旺,谢文兵,等.峰后锚固体力学特性及其再破坏特征试验研究[J].采矿与安全工程学报,2018,35(6):1115-1121.  
WANG Qizhou, YE Haiwang, XIE Wenbing, *et al.* Experimental research on mechanical properties and refracture feature of anchorage body in post-peak[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2018, 35(6):1115-1121.
- [9] 孟庆彬,韩立军,乔卫国,等.深部软岩巷道锚注支护机理数值模拟研究[J].采矿与安全工程学报,2016,33(1):27-34.  
MENG Qingbin, HAN Lijun, QIAO Weiguo, *et al.* Numerical simulation research of bolt-grouting supporting mechanism in deep soft rock roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(1):27-34.
- [10] 刘永权,刘新荣,杨忠平,等.不同类型预应力锚索锚固性能现场试验对比研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(2):275-283.  
LIU Yongquan, LIU Xinrong, YANG Zhongping, *et al.* Field test on anchorage performance of different types of prestressed cables[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2):275-283.
- [11] 赵一鸣.煤矿巷道树脂锚固体力学行为及锚杆杆体承载特性研究[D].徐州:中国矿业大学,2012.  
ZHAO Yiming. Study on mechanical behavior of epoxy bonded bolt system and bolt bearing characteristic in coal mine roadway[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012.
- [12] 孟 波,靖洪文,杨旭旭,等.破裂围岩锚固体变形破坏特征试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(12):2497-2505.  
MENG Bo, JING Hongwen, YANG Xuxu, *et al.* Experimental study of deformation and failure characteristics of anchorage in



- fractured surrounding rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013,32(12):2497-2505.
- [13] 孟波. 软岩巷道破裂围岩锚固体承载特性及工程应用研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2013.
- MENG Bo. Study of bearing characteristic of soft and fractured roadway surrounding rock anchorage unit and its applications in engineering[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology, 2013.
- [14] 王晓卿, 康红普, 赵科, 等. 黏结刚度对预应力锚杆支护效用的数值分析[J]. 煤炭学报, 2016,41(12):2999-3007.
- WANG Xiaoqing, KANG Hongpu, ZHAO Ke, *et al.* Numerical analysis of bonding stiffness for support effectiveness of pre-stressed bolts[J]. Journal of China Coal Society, 2016,41(12):2999-3007.
- [15] 康红普, 姜鹏飞, 蔡嘉芳. 锚杆支护应力场测试与分析[J]. 煤炭学报, 2014,39(8):1521-1529.
- KANG Hongpu, JIANG Pengfei, CAI Jiafang. Test and analysis on stress fields caused by rock bolting[J]. Journal of China Coal Society, 2014,39(8):1521-1529.
- [16] 侯朝炯. 深部巷道围岩控制的关键技术研究[J]. 中国矿业大学学报, 2017,46(5):970-978.
- HOU Chaojiong. Key technologies for surrounding rock control in deep roadway[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2017,46(5):970-978.
- [17] 丁书学, 靖洪文, 齐燕军, 等. 含软弱夹层锚固体变形过程中锚杆受力分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2017,34(6):1094-1102.
- DING Shuxue, JING Hongwen, QI Yanjun, *et al.* Analysis on bolt performance during deformation process of anchorage containing a weak interlayer[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2017,34(6):1094-1102.
- [18] 李东印, 王伸. 螺纹钢横肋作用下锚固体应力分布与破坏规律[J]. 煤炭学报, 2015,40(9):2026-2032.
- LI Dongyin, WANG Shen. Research on load distribution and failure of fully grouted bolt under thread steel rib[J]. Journal of China Coal Society, 2015,40(9):2026-2032.
- [19] 韦四江, 李宝富. 预紧力锚杆作用下锚固体的形成与失稳模式[J]. 煤炭学报, 2013,38(12):2126-2132.
- WEI Sijiang, LI Baofu. Anchor bolt body formation and instability mode under the influence of anchoring pretension[J]. Journal of China Coal Society, 2013,38(12):2126-2132.
- [20] 韦四江, 勾攀峰. 巷道围岩锚固体变形破坏特征的试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013,30(2):199-204.
- WEI Sijiang, GOU Panfeng. Experimental study on deformation and failure characteristics of anchored body in roadway surrounding rock[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013,30(2):199-204.