

# 巷道围岩锚固结构面剪切特性与破坏特征研究

李国锋<sup>1</sup>,王九红<sup>2</sup>,刘建荣<sup>3</sup>,陈建刚<sup>3</sup>,赵 慧<sup>2</sup>,栾恒杰<sup>3,4</sup>,董庆宝<sup>1</sup>,张孙豪<sup>4</sup>

(1. 兖矿能源集团股份有限公司 兴隆庄煤矿, 山东 兖州 272102;

2. 兖矿能源(鄂尔多斯)有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017004;

3. 内蒙古上海庙矿业有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 016299;

4. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590)

**摘要:**为研究锚固巷道围岩结构面的剪切特性与破坏特征,采用FLAC<sup>3D</sup>软件建立粗糙锚固结构面数值模型开展剪切试验,对锚固系统的剪切特性以及受力变形和破坏特征进行了系统研究。结果表明:锚杆能够有效提高结构面的抗剪能力,锚固系统的剪切应力在峰值位移处提升了0.33 MPa,在剪切结束时提升了0.93 MPa。锚杆所受剪切应力集中在结构面附近,锚杆所受的轴力在结构面两侧呈两组对称分布的压应力区和拉应力区。锚杆在结构面处的剪切应变较大,拉应变次之。锚固剂-围岩界面和锚杆-锚固剂界面的剪切应力在结构面处最大,锚杆-锚固剂界面所受剪切应力和受力范围更大。塑性破坏主要产生在锚杆与结构面相交处和结构面凸起处,锚固剂多是发生拉伸破坏,围岩则多是发生剪切破坏。锚杆-锚固剂界面更容易发生脱离,导致锚固系统失效。

**关键词:**巷道围岩;锚固结构面;剪切特性;破坏特征;数值模拟

中图分类号:TD353

文献标志码:A

## Study on shear properties and failure characteristics of bolted joint of roadway surrounding rock

LI Guofeng<sup>1</sup>, WANG Jiuhong<sup>2</sup>, LIU Jianrong<sup>3</sup>, CHEN Jiangang<sup>3</sup>, ZHAO Hui<sup>2</sup>,

LUAN Hengjie<sup>3,4</sup>, DONG Qingbao<sup>1</sup>, ZHANG Sunhao<sup>4</sup>

(1.Xinglongzhuang Coal Mine, Yankuang Energy Group Company Limited, Yanzhou, Shandong 272102, China;

2. Yankuang Energy (Ordos) Co. Ltd, Ordos, Inner Mongolia 017004, China;

3. Inner Mongolia Shanghaimiao Mining Co. Ltd, Ordos, Inner Mongolia 016299, China;

4. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

**Abstract:** To study the shear properties and failure characteristics of the bolted joint of roadway surrounding rock, a numerical model of the rough bolted joint was established by using FLAC<sup>3D</sup> software to conduct shear tests. The shear properties and the force deformation and failure characteristics of the anchoring system were systematically studied. The results show that the bolt can effectively improve the shear capacity of the structural face, and the shear stress of the anchoring system is increased by 0.33 MPa at the peak displacement and 0.93 MPa at the end of shear. The shear stress of the bolt is concentrated near the joint, and the axial force of the bolt is symmetrically distributed in two groups of compressive and tensile stress zones on both sides of the joint. The shear strain of the bolt at the joint is relatively large and the tensile strain is relatively small. The shear stresses at the anchoring agent-

收稿日期:2021-07-15

基金项目:国家自然科学基金项目(52104093);山东省自然科学基金项目(ZR2019BEE065)

作者简介:李国锋(1977—),男,黑龙江兰西人,高级工程师,硕士,主要从事矿山压力与巷道支护方面的研究。

栾恒杰(1989—),男,山东烟台人,讲师,博士,主要从事矿山岩体力学方面的研究,本文通信作者。

E-mail:luanjie0330@126.com

rock interface and the bolt-anchoring agent interface are greatest at the joint, and the shear stresses and force range at the bolt-anchoring agent interface are greater. Plastic failure occurs mainly at the intersection of bolt and joint and at the projection of joint. Tensile failure occurs at the anchoring-agent and shear failure occurs at the surrounding rock. The bolt-anchoring agent interface is more prone to detachment, resulting in anchoring system failure.

**Key words:** roadway surrounding rock; bolted joint; shear property; failure characteristic; numerical simulation

煤岩体中广泛存在着不同规模、方向和形态的结构面,如裂隙、节理、层理等结构面,导致煤岩体的强度和稳定性显著降低,极易造成巷道变形甚至失稳,严重威胁着人们的生命和财产安全<sup>[1-3]</sup>。锚固支护可有效增加煤岩体强度,控制煤岩体变形,具有安全可靠、方便快捷、经济合理等优势,被广泛应用到煤矿巷道围岩稳定性控制<sup>[4-5]</sup>。然而,当结构面在外力扰动下产生剪切滑移时,穿过结构面的锚杆将承受较大的剪切作用<sup>[6]</sup>。锚杆在拉伸和剪切载荷作用下极易破断而失去对围岩变形的控制能力,甚至导致整个支护体系失效,引发围岩大变形灾害<sup>[7]</sup>。因此,研究锚固结构面的剪切特性对于巷道围岩的稳定性评价及控制设计至关重要。锚杆的加固作用机理十分复杂,其轴力和剪力受多方面因素的影响。为探究各因素对锚杆抗拉和抗剪作用的影响和贡献,国内外诸多专家学者开展了大量有关锚固结构面剪切特性的理论与试验研究。刘泉声等<sup>[8]</sup>进行了不同锚杆安装角和不同法向应力的锚固结构面剪切试验,研究了锚杆安装角和法向应力等因素对锚固结构面抗剪性能的影响。蒋宇静等<sup>[9]</sup>开展了恒定法向应力和恒定法向刚度边界条下的锚固结构面剪切试验,研究了不同边界条件对锚固结构面剪切特性的影响。Jalalifar 等<sup>[10]</sup>研究了混凝土强度对锚杆弯曲性能的影响及锚杆直径对锚杆塑性铰位置的影响。Mirzaghorbanali 等<sup>[11]</sup>进行了一系列的双剪试验,研究了锚杆表面形态和预紧力对锚杆抗剪强度的影响。Srivastava 等<sup>[12]</sup>进行了不同锚杆数量的剪切实验,研究了锚杆间距、锚杆面积与锚固系统的黏聚力之间的关系。

数值模拟是巷道围岩锚固参数优化设计的重要手段。赵增辉等<sup>[7]</sup>采用 ABAQUS 开展了锚固结构面直剪模拟试验,研究了锚杆的弯曲变形、应力分布以及塑性破坏等特征。何栋梁等<sup>[13]</sup>使用 PFC(particle flow code)开展了锚固结构面直剪模拟实验,从细观角度分析了不同锚固角度下的岩石结构面破坏模式与锚杆变形状态。宋洋等<sup>[1]</sup>通过室内试验与 PFC 数值模拟相结合的方法,对锚固结构面进行宏观抗剪性能及剪切特性细观机理分析。王刚等<sup>[14]</sup>基于颗粒流离散元法利用修正的锚杆双线性本构模型对锚固结构面试件内部颗粒之间接触力和颗粒旋转弧度等的演化过程进行了细观研究。李为腾等<sup>[15]</sup>分别采用不同的破断准则并使用 Fish 编程语言二次开发,解决了 FLAC<sup>3D</sup>中无法实现锚杆剪切破断失效的问题,并进行模拟验证。上述研究丰富了对锚固结构面剪切特性与破坏特征的认识,但大都针对光滑结构面或二维模型,对于三维粗糙锚固结构面的研究甚少。然而,受结构面粗糙度的影响,结构面抗剪强度以及结构面的剪胀效应会显著改变锚杆的受力和变形状态。

鉴于以上认识,本研究采用 FLAC<sup>3D</sup> 软件建立三维粗糙锚固结构面数值模型开展剪切试验,深入探讨锚杆对锚固系统的剪切特性的影响以期及锚固系统中锚杆、界面和围岩的受力变形和破坏特征,以为巷道围岩结构面锚固支护优化设计提供借鉴与参考。

## 1 锚固结构面剪切变形中锚杆受力特征

锚杆在剪切过程中受到轴向拉力和横向剪力的综合作用,其中轴向拉力是由结构面剪胀和锚杆变形而造成,横向剪力由受压侧锚固剂与围岩产生的反力造成。分析<sup>[10]</sup>可知,岩性不同,锚杆的最终变形特征也不同:当岩石强度较高时,锚杆在结构面附近处的变形很小,不会产生塑性铰,如图 1(a)所示;而当岩石强度较低时,锚杆在剪切过程中会因围岩破坏而产生显著的“S”型弯曲变形,在最大弯矩处产生拉弯屈服并形成塑性铰,如图 1(b)所示。

为分析锚杆的受力,可将锚杆看做半无限长梁,在锚杆与结构面交界处的  $O$  点同时施加轴力  $N$  与剪力  $Q$ <sup>[16]</sup>,如图 1(c)所示。由图可知,在  $OA$  段,由于锚固剂和围岩产生单位长度极限反力  $p_u$  对锚杆形成一个剪力。在  $AB$  段,由于锚固剂、围岩和锚杆的变形关系,锚固剂和围岩产生的反力  $q_x$  逐渐变小,并在塑性

较处( $B$ 点)减小到0。在 $BC$ 段,锚杆的剪力方向发生改变,且在锚杆剪切变形中,当塑性铰形成后,锚杆发生剪切屈服,在后续的变形阶段, $OB$ 段具有类似桁架杆件的力学性质,即锚杆所能承受的剪切载荷不再增加<sup>[4]</sup>,而轴向拉伸载荷逐渐增加,直至锚杆发生破坏为止。

## 2 锚固结构面剪切数值模型

### 2.1 数值模型建立

目前,在 $FLAC^{3D}$ 中主要采用两种方式来模拟锚杆,其一是 $PILE$ 等结构单元,其二是实体单元。两种方式都有其各自的特点: $PILE$ 等结构单元能够省去大量的节点和网格,可大幅减少模型计算量以及求解时间,适合工程尺度模拟研究;实体单元能够更精细地反映锚杆的受力和变形过程,但网格数量多,运算量大,更适合小尺度的机理模拟研究。为深入研究锚固结构面的剪切特性,采用实体单元来模拟锚杆。

采用 $FLAC^{3D}$ 软件直接建立锚固结构面试件模型的过程十分复杂。因此,参照已开展的粗糙锚固结构面剪切试验<sup>[9]</sup>,利用辅助软件建立相应的数值模型,然后导入 $FLAC^{3D}$ 中进行数值模拟试验,具体步骤为:首先,利用三维激光扫描技术获取岩石结构面的密集点云坐标数据,如图2(a)所示;然后,利用点云数据在建模软件中建立粗糙锚固结构面数值模型,如图2(b)所示;最后,将上述试件模型导入到 $FLAC^{3D}$ 中进行计算。试件模型尺寸为:长200 mm、宽100 mm、高100 mm,共划分四面体单元111 333个,节点84 954个,锚杆直径6 mm,锚固剂厚度2 mm。

数值模型的边界条件和加载方式与室内试验一致,如图2(c)所示。即模型的顶面为恒定法向应力边界条件,底面在法向方向上固定,上部岩块的右侧在剪切方向上固定。在模型顶部施加恒定的法向应力,考虑到常见锚固工程支护一般位于地下巷道、硐室等围岩2~3 m以浅的范围内,支护范围内的围岩应力远低于原始地应力,根据相关经验选取法向应力为2 MPa。待模型施加法向载荷计算达到平衡后,再通过给下部岩块施加0.5 mm/min的恒定水平速度实现锚固结构面的剪切运动。剪切模拟过程中对相关变量进行监测,以加载面上节点的水平位移代表结构面的剪切位移,以Interface上的剪切应力代表结构面自身所受剪切应力,以沿剪切方向限制边界侧的不平衡力为锚固系统的剪切应力。

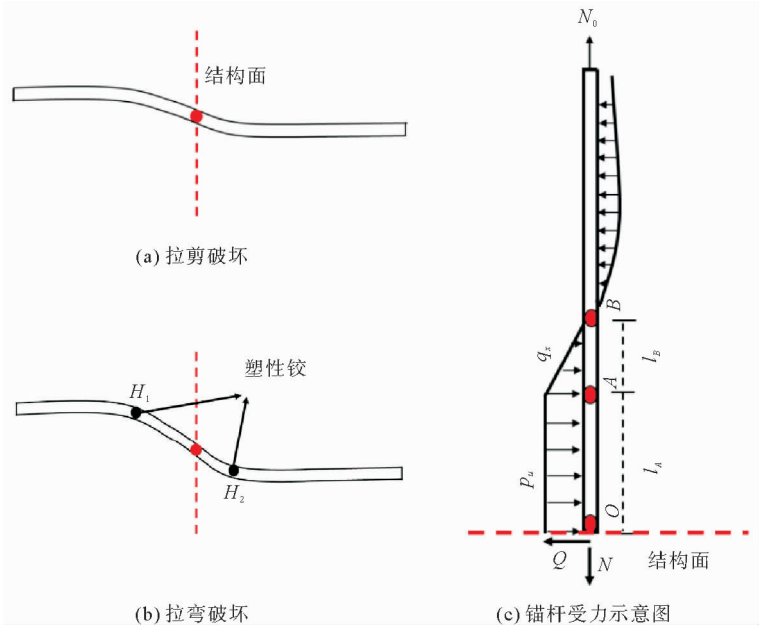


图1 锚杆变形受力示意图<sup>[10]</sup>

Fig. 1 Deformation and force diagrams of bolt

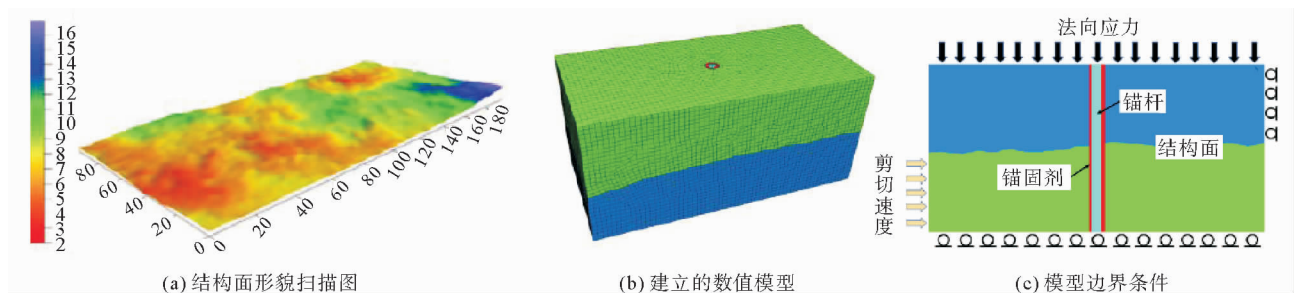


图2 数值模型的建立及模型边界条件

Fig. 2 Establishment and boundary conditions of numerical model

## 2.2 模型参数选取

数值模型中岩块和锚固剂都采用常用的莫尔-库仑模型,锚杆则参考文献[17]采用各向同性弹性模型。模型中的锚杆-锚固剂、锚固剂-围岩以及上下岩块之间都通过建立Interface来实现各界面间的力学行为。为选择合理的参数,参照文献[9]试验结果,采用试错法反复调参,直到模拟得到的剪切应力-剪切位移曲线与试验结果相接近,如图3所示。最终确定的模型物理力学参数如表1和表2所示。数值模拟和室内试验剪切应力-剪切位移曲线初始阶段有一定差别,这是由于在试验中施加法向应力后不完全吻合的试件会轻微错动,造成初始剪切应力提高,而在模拟中模型完全吻合,不会产生这种现象。

值得注意的是,由上述分析可知,锚杆在屈服后抗剪强度不再增加,在弹性阶段内的抗剪能力才是控制结构面剪切变形的关键。虽然弹性本构模型仅能模拟锚杆在弹性阶段的力学特性,考虑到仅对锚固结构面在小剪切位移内的变形和受力特征进行研究,因此选用弹性模型模拟锚杆是合理的。

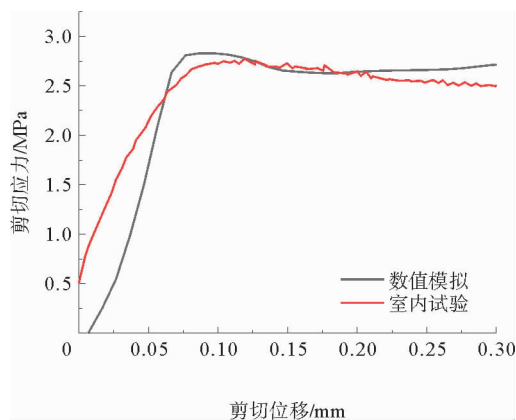


图3 数值模拟和室内试验剪切应力-剪切位移曲线对比

Fig. 3 Comparison of shear stress-shear displacement curves between numerical simulation and laboratory test

表1 模型中各材料的力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of each material in the model

材料	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	内摩擦角/(°)	内聚力/MPa	抗拉强度/MPa
岩石试件	28.7	16.7	63.3	5.3	2.5
锚固剂	6.9	5.6	30.0	4.0	2.0
锚杆	14.3	6.6	—	—	—

表2 模型中各接触面的力学参数

Tab. 2 Mechanical parameters of each interface in the model

接触面类型	法向刚度/(GPa/m)	剪切刚度/(GPa/m)	内摩擦角/(°)	内聚力/MPa	抗拉强度/MPa
岩石-岩石	30	30	21	0.19	0
岩石-锚固剂	3	3	30	1.00	10
锚固剂-锚杆	30	30	32	10.00	10

## 3 数值模拟结果与分析

### 3.1 锚固结构面剪切力学特性

为分析锚杆对结构面的加固作用,剪切过程中分别监测锚固系统和结构面的剪切应力,得到如图4所示的剪切应力-剪切位移曲线。可以看出,在锚杆弹性阶段内,两条剪切应力-剪切位移曲线的发展趋势大都分为4个阶段。第Ⅰ阶段:剪切初始阶段,结构面上剪切应力迅速增加,此阶段由于剪切位移很小,锚杆的抗剪能力几乎未被调动,锚固系统的剪切应力几乎与结构面的剪切应力一致。第Ⅱ阶段:由于剪切位移进一步增大,锚杆的抗剪能力逐渐开始发挥作用,锚固系统的剪切应力开始大于结构面的剪切应力,且两者差值逐渐增大。第Ⅲ阶段:二者的剪切应力达到峰值后,由于结构面粗糙体破坏程度逐渐增加,结构面剪切应力曲线呈明显的下降趋势,由于锚杆发挥的抗剪效果逐渐显著,锚固系统的剪切应力曲线下下降不明显。第Ⅳ阶段:

结构面剪切应力曲线趋于平稳,由于锚杆提供的剪切应力仍不断增大,锚固系统剪切应力仍呈上升趋势,增幅并不显著。相对于结构面自身,锚固系统的剪切应力在峰值剪切位移处提升 0.33 MPa,在剪切结束时提升 0.93 MPa。

### 3.2 锚杆受力和变形特征

剪切荷载作用下,穿过结构面的锚杆与围岩相互作用,此过程中锚杆的变形和受力不断演化,整个锚固体系的内在作用机制十分复杂。采用实体单元模拟锚杆监测得到锚杆各部位的受力状态,剪切结束时锚杆的剪切应力和轴向应力分布特征如图 5 所示。可以看出,锚杆所受的剪切应力主要集中在结构面附近,并且与结构面大致呈  $45^\circ$  方向贯穿整个锚杆(图中蓝色部分)。而锚杆的轴力则在结构面两侧呈现出两组基本对称的应力分布集中区,分别为压应力区和拉应力区。

为进一步量化分析锚杆的受力特征,采用自编 FISH 函数在锚杆左侧、中间和右侧分别布置 3 条测线将锚杆的剪切应力和轴向应力导出并绘制成曲线,如图 6 所示,其中负值代表压应力,正值代表拉应力。由图 6(a)所示的锚杆剪切应力分布图可以看出,沿锚杆的剪切应力主要集中在结构面两侧 15 mm 内的位置,其他位置的剪切应力几乎为 0。锚杆剪切应力在结构面附近达到峰值,向锚杆两端逐渐降低,甚至在距离结构面 5 mm 的位置发生方向改变,逐渐增大到 4 MPa 左右后又逐渐下降到 0。锚杆右、中、左部位所受剪切应力大小不同。整体上是锚杆两侧的受力大于中间,如从右侧到左侧最大剪切应力分别为 -46.53、-29.46 和 -39.97 MPa。由图 6(b)所示的锚杆轴向应力分布图可以看出,沿锚杆的轴力分布则大致呈“S”型,并且也主要集中在结构面两侧 15 mm 内的位置,其他位置的轴力几乎为 0。锚杆右侧的轴向应力和左侧的轴向应力方向相反,锚杆中间部分轴向应力的方向同右侧一致,这种轻度的不对称是由结构面粗糙不平导致的。从右侧到左侧最大压应力分别为 -29.51、-3.65 和 -15.84 MPa,从右侧到左侧最大拉应力分别为 73.04、54.00 和 66.79 MPa,整体上来看锚杆所受拉应力较大。

模拟得到的锚杆剪切应变和体积应变分布特征如图 7 所示,其中负值代表压应变,正值代表拉应变。可以看出,锚杆变形主要集中在结构面附近,其中,剪切应变大致在距结构面 30 mm 范围内,体积应变大致在距结构面 15 mm 范围内。剪切应变曲线变化趋势同沿锚杆剪切应力分布曲线相近,最大值为  $6.7 \times 10^{-3}$ ,体积应变曲线变化趋势同沿锚杆轴向应力分布曲线相近,最大值为  $4.6 \times 10^{-3}$ 。由图 7 还可看出,锚杆右侧、中间和左侧在结构面处的剪切应变几乎相等,分别为  $6.5 \times 10^{-3}$ 、 $6.7 \times 10^{-3}$  和  $6.7 \times 10^{-3}$ ,并且左右两侧

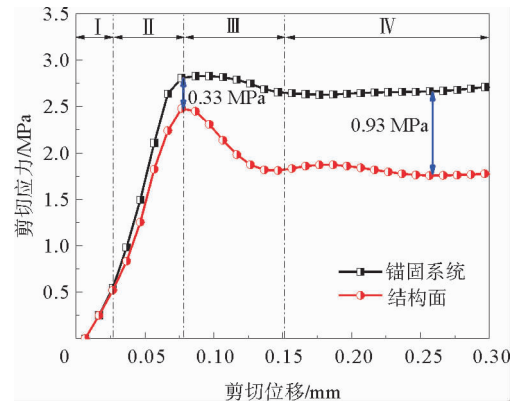


图 4 锚固结构面剪切应力-剪切位移曲线

Fig. 4 Shear stress-shear displacement curves of bolted joint

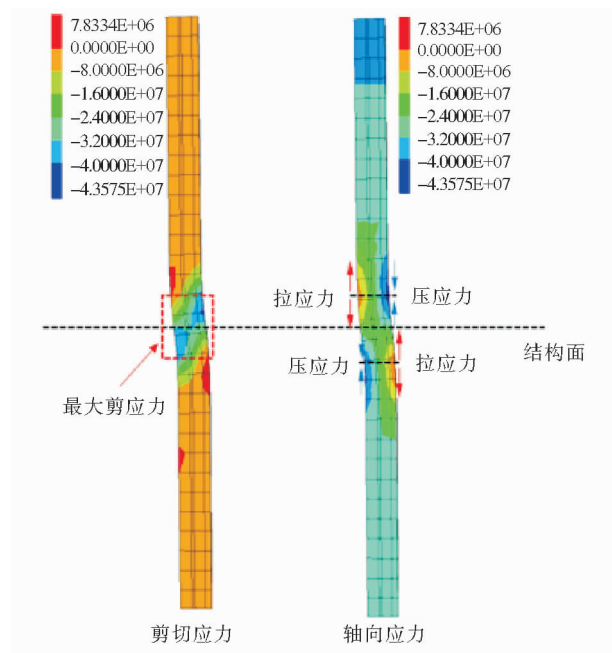


图 5 锚杆剪切应力和轴向应力分布云图

Fig. 5 Shear stress and axial stress distribution cloud of bolt



剪切应变较为对称。锚杆体积应变有正有负,其中负值为压应力产生的压应变,正值为由拉应力产生的拉应变。从锚杆右侧到左侧,锚杆最大压应变分别为 $-3.8 \times 10^{-3}$ 、 $-2.3 \times 10^{-3}$ 和 $-3.5 \times 10^{-3}$ ,最大拉应变分别为 $4.7 \times 10^{-3}$ 、 $3.3 \times 10^{-3}$ 和 $4.7 \times 10^{-3}$ 。由此可见,在剪切过程中,锚杆在结构面处的剪切应变较大,其次是在结构面两侧的拉应变。

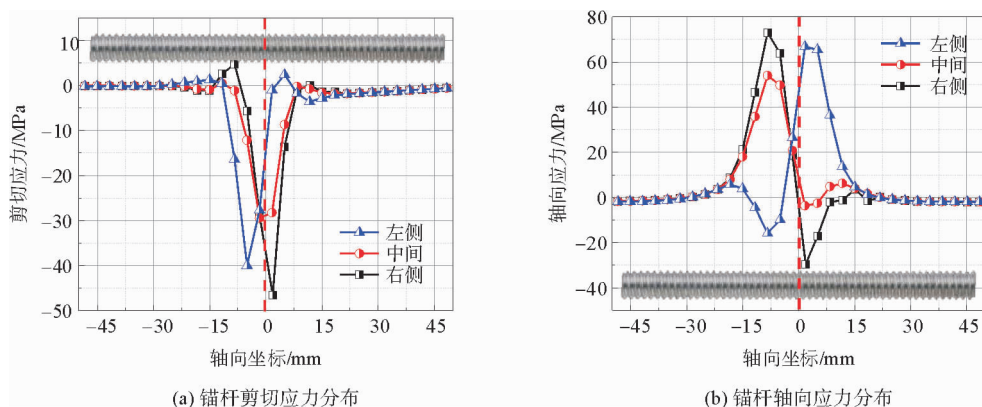


图6 锚杆剪切应力和轴向应力分布曲线

Fig. 6 Shear stress and axial stress distribution curves of bolt

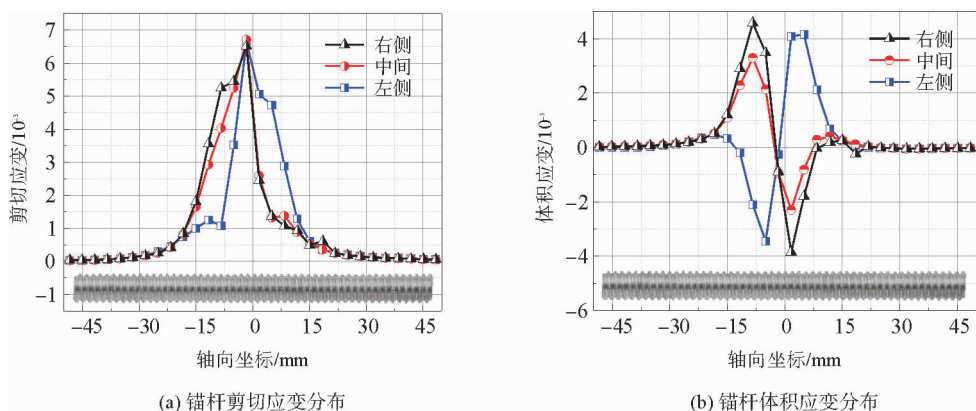


图7 锚杆剪切应变和体积应变分布曲线

Fig. 7 Shear strain and volume strain distribution curves of bolt

### 3.3 界面剪切应力分布特征

大量研究和现场实践表明:锚固系统中的锚杆-锚固剂界面以及锚固剂-围岩界面是锚固系统中的薄弱环节,界面滑移是锚固系统的主要破坏形式之一。因此,锚杆-锚固剂界面和锚固剂-围岩界面的剪切应力分布对于锚固系统的稳定至关重要。图8所示为剪切结束时沿锚杆-锚固剂界面和锚固剂-围岩界面的剪切应力分布图。可以看出,两个界面的剪切应力主要集中在结构面附近,并且锚杆-锚固剂界面上的最大剪切应力大于锚固剂-围岩界面上的,分别为29.05和25.07 MPa。

为更好地分析两个界面的受力特征,使用FISH函数分别监测两个界面最左侧和最右侧的剪切应力,得到如图9(a)所示的锚固结构面各界面剪切应力分布曲线。可以看出,锚杆-锚固剂界面两侧的剪切应力大致呈“山”字型分布,在结构面附近位置最大,左右两侧的剪切应力峰值分别为16.77和12.80 MPa,向锚杆两端逐渐降低至0,之后又逐渐增大到7.62 MPa,最后在距结构面30 mm以外趋于0。锚固剂-围岩界面两侧剪切应力曲线大致也呈“山”字型,同样在结构面附近位置最大,左右两侧的剪切应力峰值分别为12.51和12.76 MPa,向锚杆两端逐渐降低至0,之后有一个较小的回弹,最大为2.89 MPa,最后在距离结构面20 mm以外趋于0。由此可知,相对于锚固剂-围岩界面,锚杆-锚固剂界面所受剪切应力更大,且受力范围也更大。

### 3.4 锚固结构面剪切变形破坏特征

模拟得到的锚固结构面破坏分布如图 10 所示。由图 10(a)所示的围岩和锚固剂塑性区分布可知,在锚杆与结构面相交部分产生的塑性区最大,其次是结构面上粗糙体凸起部分。这是由于,在锚固结构面剪切过程中,锚杆与结构面相交的位置,锚杆与锚固剂和围岩相互作用,是主要承载部位,而粗糙结构面上的凸起是结构面上发挥抗剪作用的主要部位<sup>[18]</sup>。其中,锚固剂在 I 区和 IV 区主要发生拉伸破坏,在 II 区和 III 区主要发生剪切破坏,并在 II 区也存在少量拉伸破坏。这主要是由于锚杆在 I 区和 IV 区发生较大的拉伸变形,导致这部分的锚固剂产生较大拉伸变形,进而产生拉伸破坏,而其他两个区域主要是受锚杆与围岩的相互挤压,发生剪切破坏。围岩在结构面附近产生较多剪切破坏,这是由于上下试件相互错动,结构面上的凸起受较大的法向应力和剪切应力发生剪切破坏。锚杆与结构面相交处锚杆受力和变形最大,因此这部分围岩承受较大的力,产生大量塑性破坏。

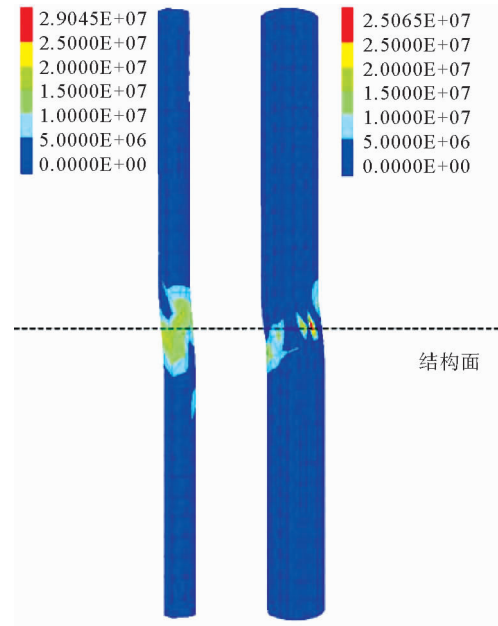


图 8 锚固结构面各界面剪切应力分布云图

Fig. 8 Shear stress clouds of each interface of bolted joint

锚杆与结构面相交处锚杆受力和变形最大,因此这部分围岩承受较大的力,产生大量塑性破坏。

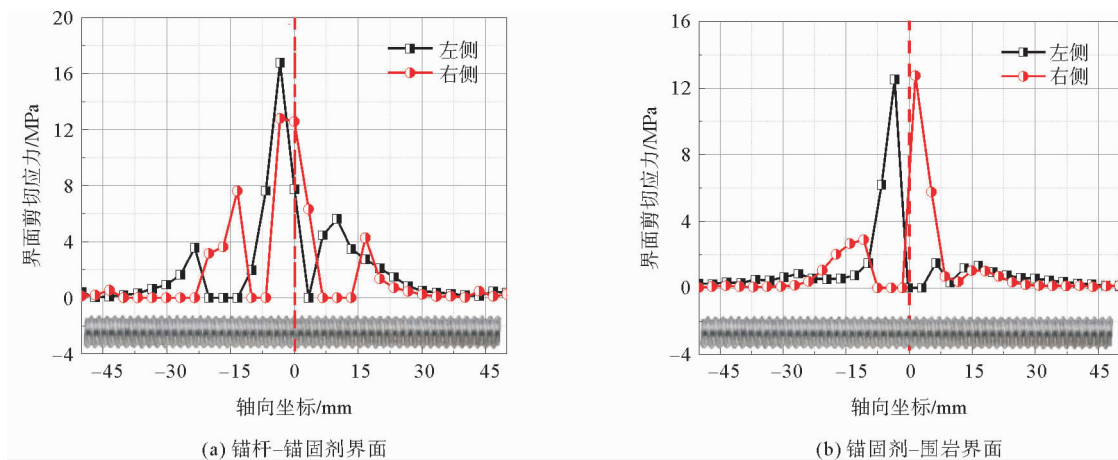


图 9 锚固结构面各界面剪切应力分布曲线

Fig. 9 Shear stress distribution curves of each interface of bolted joint

由于锚杆、锚固剂以及围岩的刚度不同,在剪切过程中锚杆-锚固剂界面和锚固剂-围岩界面会产生相对位移,沿界面切向产生滑移,或者沿界面法向相互分离,如图 10(b)所示。为研究锚固系统中两个界面的滑移规律,对两个界面的滑动和接触特征进行监测,得到如图 10(c)所示的界面剪切滑移和分离分布图。可以看出,锚杆-锚固剂界面与锚固剂-围岩结构面的滑移区同样集中在结构面附近,且两个界面的滑移位置与破坏范围相差较大。锚杆-锚固剂界面的滑移范围较小,集中于结构面和拉应变较大位置,而锚固剂-围岩界面的滑移范围较大,主要分布在拉应变较大处。这是由于这部分的锚杆和锚固剂变形较大,界面之间的相对位移较大。还可以看出,两个界面的法向分离情况差别更显著,锚杆-锚固剂界面较大部分发生分离,而锚固剂-围岩界面仅在结构面附近发生小部分分离。综合来看,相比于锚固剂-围岩界面,锚杆-锚固剂界面更容易发生脱离,导致锚固系统失效,这是由于锚杆-锚固剂界面所受剪切应力更大,这与其他学者的研究结论一致<sup>[19]</sup>。

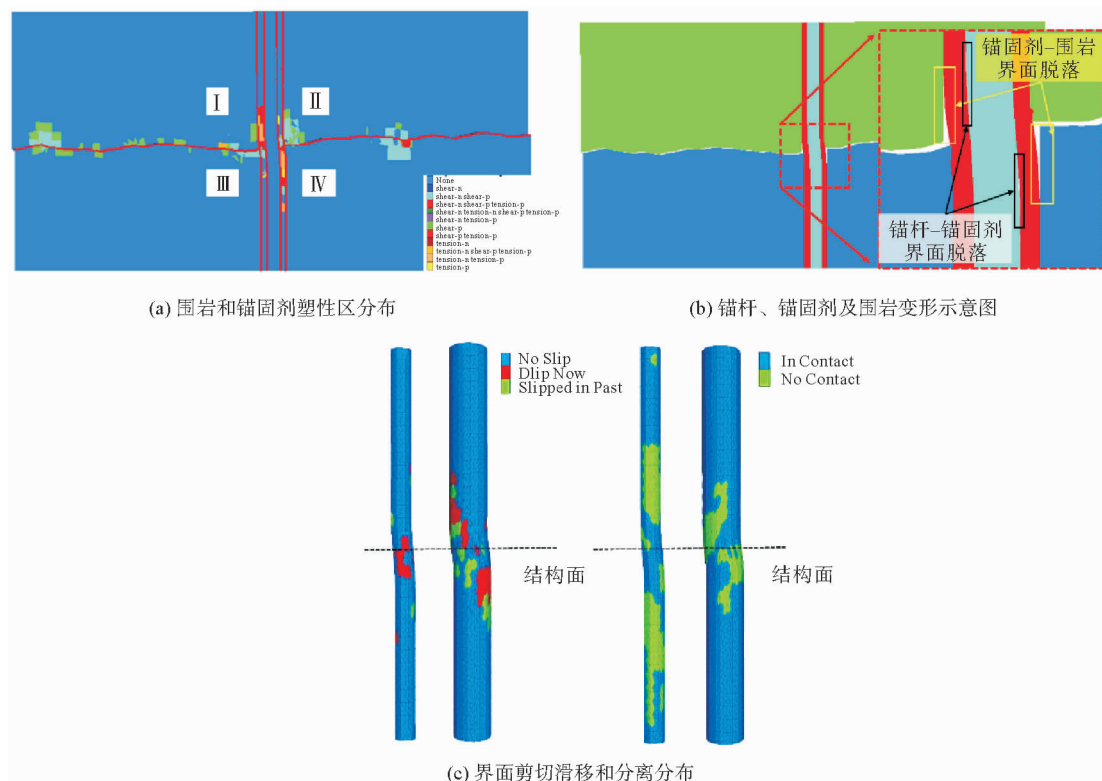


图 10 锚固结构面剪切变形破坏特征

Fig. 10 Shear deformation and failure characteristics of bolted joint

#### 4 结论

1) 锚杆能够有效提高巷道围岩结构面的抗剪能力,且不同剪切阶段的提升效果明显不同。相对于结构面自身,锚固系统的剪切应力在峰值剪切位移处提升了 0.33 MPa,在剪切结束时提升了 0.93 MPa。

2) 锚杆所受的剪切应力集中在结构面附近,与结构面大致呈  $45^\circ$  方向贯穿整个锚杆,锚杆所受的轴力则在结构面两侧呈两组基本对称分布的压应力区和拉应力区,且锚杆所受拉应力较大。锚杆在结构面处的剪切应变较大,拉应变次之。

3) 锚固剂-围岩界面和锚杆-锚固剂界面两侧的剪切应力在结构面处最大,向锚杆两端方向先降低至 0 且经过一个小的回弹后继续降低,分别在距离结构面 30 和 20 mm 后趋于 0。相比于锚固剂-围岩界面,锚杆-锚固剂界面所受剪切应力更大,且受力范围也更大。

4) 锚固结构面中的塑性破坏主要产生在锚杆与结构面相交处和结构面凸起处,其中锚固剂多是发生拉伸破坏,围岩则多是发生剪切破坏。相比于锚固剂-围岩界面,锚杆-锚固剂界面更容易发生脱离,导致锚固系统失效。

#### 参考文献:

- [1] 宋洋,张峰源,李永启,等.锚固的贯通节理岩体剪切破坏特性分析[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(5):133-140.  
SONG Yang, ZHANG Fengyuan, LI Yongqi, et al. Shear failure mode of anchored rock mass with through joints[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(5): 133-140.
- [2] 李金奎,王浩.深部巷道复合顶板全锚索一次支护研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2020,2(3):14-22.  
LI Jinkui, WANG Hao. Ground support of interbedded rock roof in a deep roadway with fully-anchored cables[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2020, 2(3): 14-22.
- [3] 王东亮,郝兵元,梁晓敏.基于流固耦合的单一裂隙浆液扩散规律研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2021,3(1):104-112.  
WANG Dongliang, HAO Bingyuan, LIANG Xiaomin. Slurry diffusion of single fracture based on fluid-solid coupling[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(1): 104-112.



- [4] 王志,尹延春,赵同彬,等.软岩巷道扩孔锚固机理及支护控制数值模拟研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2021,40(3):35-43.  
WANG Zhi,YIN Yanchun,ZHAO Tongbin,et al.Numerical simulation study on bolting mechanism and support control of soft rock roadway[J].Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2021,40(3):35-43.
- [5] 刘泉声,雷广峰,彭星新.深部裂隙岩体锚固机制研究进展与思考[J].岩石力学与工程学报,2016,35(2):312-332.  
LIU Quansheng,LEI Guangfeng,PENG Xingxin.Advance and review on the anchoring mechanism in deep fractured rock mass[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(2):312-332.
- [6] LI C C.Field observations of rock bolts in high stress rock masses[J].Rock Mechanics and Rock Engineering,2010,43(4):491-496.
- [7] ZHAO Z H,GAO X J,TAN Y L,et al.Theoretical and numerical study on reinforcing effect of rock-bolt through composite soft rock-mass[J].Journal of Central South University,2018,25(10):2512-2522.
- [8] 刘泉声,雷广峰,彭星新,等.锚杆锚固对节理岩体剪切性能影响试验研究及机制分析[J].岩土力学,2017,38(增1):27-35.  
LIU Quansheng,LEI Guangfeng,PENG Xingxin,et al.Experimental study and mechanism analysis of influence of bolt anchoring on shear properties of jointed rock mass[J].Rock and Soil Mechanics,2017,38(S1):27-35.
- [9] 蒋宇静,张孙豪,栾恒杰,等.恒定法向刚度边界条件下锚固节理岩体剪切特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(4):663-675.  
JIANG Yujing,ZHANG Sunhao,LUAN Hengjie,et al.Experimental study on shear characteristics of bolted rock joints under constant normal stiffness boundary conditions[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2021,40(4):663-675.
- [10] JALALIFAR H,AZIZ N.Analytical behaviour of bolt-joint intersection under lateral loading conditions[J].Rock Mechanics and Rock Engineering,2010,43(1):89-94.
- [11] MIRZAGHORBANALI A,RASEKH H,AZIZ N,et al.Shear strength properties of cable bolts using a new double shear instrument,experimental study,and numerical simulation[J].Tunnelling and Underground Space Technology,2017,70:240-253.
- [12] SRIVASTAVA L P,SINGH M.Effect of fully grouted passive bolts on joint shear strength parameters in a blocky mass [J].Rock Mechanics and Rock Engineering,2015,48(3):1197-1206.
- [13] 何栋梁,杨伟军,林杭,等.锚固节理直剪力学行为的颗粒流数值分析[J].工程地质学报,2019,27(2):302-310.  
HE Dongliang,YANG Weijun,LIN Hang,et al.Numerical analysis for direct shear test of bolted joint based on particle flow code[J].Journal of Engineering Geology,2019,27(2):302-310.
- [14] 王刚,袁康,蒋宇静,等.基于颗粒离散元法的锚固节理剪切行为宏观研究[J].煤炭学报,2014,39(12):2381-2389.  
WANG Gang,YUAN Kang,JIANG Yujing,et al.Macro-micro mechanical study on bolted joint subjected to shear loading based on DEM[J].Journal of China Coal Society,2014,39(12):2381-2389.
- [15] 李为腾,杨宁,李廷春,等.FLAC<sup>3D</sup>中锚杆破断失效的实现及应用[J].岩石力学与工程学报,2016,35(4):753-767.  
LI Weiteng,YANG Ning,LI Tingchun,et al.Implementation of bolt broken failure in FLAC<sup>3D</sup> and its application[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(4):753-767.
- [16] 刘泉声,雷广峰,彭星新,等.节理岩体中锚杆剪切力学模型研究及试验验证[J].岩土工程学报,2018,40(5):794-801.  
LIU Quansheng,LEI Guangfeng,PENG Xingxin,et al.Shearing mechanical model and experimental verification of bolts in jointed rock mass[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2018,40(5):794-801.
- [17] 王广辉,王襄禹,杨建雄,等.预应力锚固体控制节理围岩变形的机理分析[J].中国矿业大学学报,2021,50(1):60-68.  
WANG Guanghui,WANG Xiangyu,YANG Jianxiong,et al.Mechanism analysis of pre-stressed bonded rock bolt controlling the deformation in joint surrounding rocks[J].Journal of China University of Mining & Technology,2021,50(1):60-68.
- [18] 蒋宇静,张孙豪,栾恒杰,等.剪切载荷作用下岩体结构面动态接触特征数值模拟[J].煤炭学报,2022,47(1):233-245.  
JIANG Yujing,ZHANG Sunhao,LUAN Hengjie,et al.Numerical study on the 3D surface dynamic contact characteristics of rock discontinuity subjected to shear loading[J].Journal of China Coal Society,2022,47(1):233-245.
- [19] 林健,任硕,杨景贺.树脂全长锚固锚杆外形尺寸优化实验室研究[J].煤炭学报,2014,39(6):1009-1015.  
LIN Jian,REN Shuo,YANG Jinghe.Laboratory research of resin full-length anchoring bolts dimension optimization[J].Journal of China Coal Society,2014,39(6):1009-1015.