

基于 Pile 单元改进模型的锚杆锚固 角度效应数值模拟研究

左海峰¹, 蒋宇静^{1,2,3}, 李春平¹, 刘光饶¹, 张孙豪³, 管彦太¹, 栾恒杰², 刘建荣¹, 李鑫鹏²

(1. 内蒙古上海庙矿业有限责任公司 院士专家工作站, 内蒙古 鄂尔多斯 016299;

2. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590; 3. 长崎大学 工学研究科, 日本 长崎 8528521)

摘要:为探究锚杆在不同锚固角度下的受力特征和作用机制,采用 Pile 单元改进模型建立具有不同锚固角度的锚固结构面数值模型,并开展一系列的单轴压缩数值试验,对锚杆的锚固角度效应进行了系统研究。结果表明:当锚固角较大时,锚固结构面试件加载过程分为 4 个阶段,而当锚固角较小时仅为 3 个阶段;随着锚固角的增加,峰值应力整体上先恒定后减小,弹性模量呈非线性降低;锚杆与试件力的相互作用主要分布在结构面与锚杆相交处以及锚杆两端;锚杆的显著变形和受力主要分布在结构面附近,大致为锚杆直径的 3~4 倍;随着锚固角的增大,锚杆轴力的贡献呈非线性减小,锚杆剪力的贡献呈线性增大,锚杆抗剪力呈非线性减小。

关键词:结构面;锚杆支护;角度效应;Pile 单元;改进模型

中图分类号:TD353;TU45

文献标志码:A

Numerical simulation of anchor angle effect of bolts based on modified model of Pile element

ZUO Haifeng¹, JIANG Yujing^{1,2,3}, LI Chunping¹, LIU Guangrao¹, ZHANG Sunhao³,

GUAN Yantai¹, LUAN Hengjie², LIU Jianrong¹, LI Xinpeng²

(1. Academician (Expert) Workstation, Inner Mongolia Shanghaimiao Mining Co. Ltd, Ordos 016299, China;

2. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

3. Graduate School of Engineering, Nagasaki University, Nagasaki 8528521, Japan)

Abstract: To investigate the force characteristics and action mechanism of bolts under different anchor angles, this paper establishes numerical models of bolted rock joints with different anchor angles based on modified Pile elements and carries out a series of uniaxial compression numerical tests to systematically study the anchor angle effect of bolts. The results show that the loading process of the bolted rock joint is divided into four stages when the anchor angle is large, while it is divided only into three stages when the anchor angle is small. With the increase of the anchor angle, the peak stress as a whole is constant first and then decreases, while the elastic modulus decreases nonlinearly. The interaction of force between the bolt and the specimen is mainly distributed at the intersection of the rock joint and the bolt and at the two ends of the bolt. The prominent deformation and force of the bolt are mainly distributed near the rock joint, roughly 3~4 times of the bolt diameter. With the increase of the anchor angle, the contribution of bolt axial force decreases nonlinearly; the contribution of bolt shear force increases linearly; and the bolt shear resistance also decreases nonlinearly.

Key words: rock joint; bolt support; angle effect; Pile element; modified model

收稿日期:2023-01-05

基金项目:国家自然科学基金项目(52104093);山东省中央引导地方科技发展专项资金项目(YDZX2022141)

作者简介:左海峰(1988—),男,山东济宁人,工程师,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,副教授,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

随着开采强度及深度的不断增加,煤矿巷道围岩破裂变形、支护结构损毁等现象发生的频度明显增加,围岩的稳定性及灾变问题相当突出^[1]。在地应力和采动应力的共同作用下,巷道围岩极易沿层理、节理和裂隙等结构面发生剪切滑移,导致巷道围岩大变形和锚杆剪切失效等现象^[2]。目前大多锚固节理剪切特性的研究工作是针对垂直安装的锚杆开展的^[3-5],而工程实际中倾斜安装的锚杆也较为普遍。

为揭示锚固角度对锚固结构面剪切特性的影响规律,诸多学者通过理论分析、室内试验以及数值模拟等方法开展了研究。刘泉声等^[6]依据最小余能原理,建立了考虑等效剪切面积的加锚节理面抗剪强度理论计算模型,讨论了锚固角对锚固结构面抗剪强度的影响规律。黎海滨等^[7]基于经典梁理论,建立了剪切方向与锚杆倾向共面条件下的力学模型,对锚固结构面最佳锚固角的问题进行了系统分析。周辉等^[8]制作不同锚固角的结构面试件,通过室内单轴压缩试验研究预应力锚杆的锚固止裂效应。Srivastava 等^[9]对具有天然结构面的天然试件和具有光滑结构面的人工试件进行了加锚和无锚的单轴压缩试验,获得了锚固角对锚固结构面试件强度和弹性模量的影响规律。赵同彬等^[10]对具有不同锚固角的锚固结构面试件进行了单轴压缩试验,分析了加锚前后结构面岩石破坏形态和强度特征,并采用数字散斑相关方法,研究了加载全过程变形场演化规律及锚固控制机制。武东阳等^[11]使用 PFC 数值模拟软件,对锚固结构面试件进行了单轴压缩试验,研究了不同锚固角对裂纹扩展的影响,模拟结果表明,锚固角为 45°时,锚杆锚固作用最明显。陈森等^[12]在 PFC 数值模拟软件中,采用 Clump 单元及 Wall 单元分别模拟锚杆杆体及垫片,建立具有不同锚固角的锚固断续节理试件,从细观角度分析了锚固角对锚固断续节理强度的影响规律。但上述研究对锚固结构面剪切特性的认识仍有不足,对于不同锚固角度下锚杆受力特征和作用机制等缺乏定量研究。

鉴于以上认识,基于 Pile 单元改进模型,建立了具有不同锚固角度的锚固结构面数值模型,并对其进行单轴压缩数值模拟试验,对不同锚固角度条件下,锚固结构面强度、弹性模量以及围岩破坏范围等进行系统分析,同时探究了锚固角对锚杆轴力、剪切力以及对锚固结构面抗剪力贡献值的影响规律,为巷道围岩控制设计提供科学借鉴与参考。

1 数值模型的建立及模拟方案

1.1 改进 Pile 结构单元简介

FLAC3D 中的 Pile 结构单元由节点、结构构件以及耦合弹簧-滑块组成,可与实体单元进行力、位移以及弯矩等的传递,模拟锚杆杆体轴向受拉和切向受剪等受力特征^[13]。由图 1(a)力学本构模型可知,Pile 结构单元可以模拟出锚杆受拉破坏,但不能实现锚杆的受剪破坏^[14],这与实际情况不符,因此有必要对其进行修正。众多研究表明,锚杆的剪切屈服和剪切破坏均是在拉剪耦合作用下发生的^[6,15],Pile 结构单元的剪切屈服和破坏模型必须基于拉剪耦合失效理论。本研究使用改进 Pile 结构单元^[16],如图 1(b)所示。修正 Pile 结构单元模型中增加了考虑拉剪耦合的锚杆剪切破断模型(模式 I),而且将上述锚杆屈服判据嵌入 Pile 结构单元,锚杆屈服后在破断前剪力保持不变(模式 II),直至发生拉伸破断。

1.2 数值模型建立

当无锚固结构面试件的倾斜角度为 45°时,试件主要发生滑动破坏,试件的抗压强度基本由结构面摩擦提供,岩石本身的强度并未被调用,这有利于定量分析不同锚固角度对结构面抗剪强度的提升效果^[9]。因此,本研究结构面倾斜角度设计为 45°,通过改变锚杆的安装角度建立不同锚固角度(15°、30°、45°、60°、75°、90°)的模型,如图 2 所示。

数值模型参照 Srivastava 试验^[9]建立,以便于参数的取值以及模型验证,模型尺寸为 150 mm(长)×150 mm(宽)×300 mm(高),结构面位于试件中部,间隔 50 mm 开两个直径 10 mm 的钻孔并安装直径 6 mm 的锚杆,全长锚固,无预紧力,锚杆在试件表面采用螺母垫片固定。模型共计 54 000 个单元,59 582 个节点。数值模型的边界条件和加载方式与室内试件试验采用的一致,即固定试件底端,对试件顶端施加恒定的速率(2×10^{-6} m/s)。模拟中监测试件上下表面的反力和位移来计算试件的应力和应变,通过锚杆的轴力、剪力、转角以及结构面剪力计算锚固结构面的剪切应力,具体计算方法见文献^[16]。

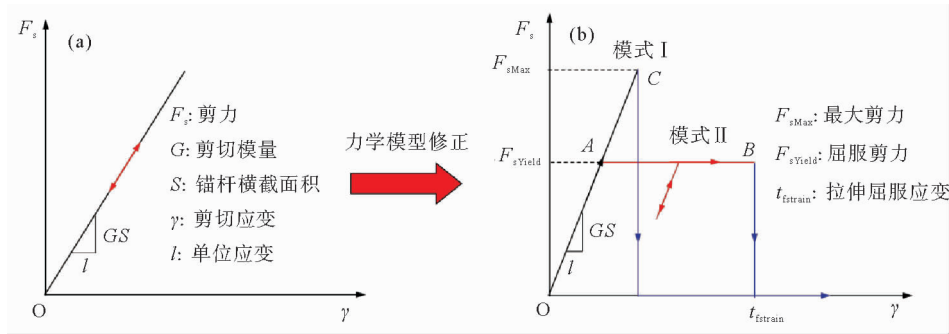


图 1 Pile 结构单元剪切力学模型及修正 Pile 结构单元剪切力学模型^[16]

Fig. 1 Pile structural element shear mechanics model and the modified Pile structural element shear mechanics model

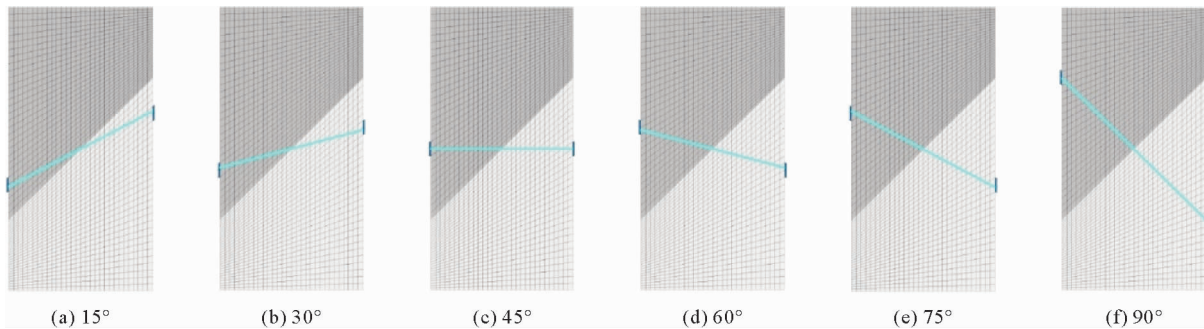


图 2 不同锚固角的锚固结构面试件示意图

Fig. 2 Schematic diagram of bolted rock joints with different anchor angles

1.3 模型参数及验证

选用摩尔-库伦本构模型模拟岩石, Interface 模拟结构面, 岩石的物理力学参数: 密度 $2\,500\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、弹性模量 6.22 GPa 、剪切模量 3.52 GPa 、抗拉强度 10 MPa 、摩擦角 42° 、黏聚力 20 MPa 。结构面的物理力学参数: 法向刚度 $16\text{ GPa}\cdot\text{m}^{-1}$ 、剪切刚度 $16\text{ GPa}\cdot\text{m}^{-1}$ 、摩擦角 21° 、黏聚力 0 。使用改进 Pile 结构单元模拟锚杆, Liner 结构单元模拟垫片, 模型参数参照文献^[14]选取, 其中锚杆的物理力学参数: 弹性模量 200 GPa 、泊松比 0.2 、惯性矩 $6.36\times 10^{-11}\text{ m}^4$ 、极惯性矩 $12.7\times 10^{-11}\text{ m}^4$ 、切向黏结力 $2\text{ MN}\cdot\text{m}^{-1}$ 、切向黏结刚度 $20\text{ MN}\cdot\text{m}^{-2}$ 、切向摩擦角 45° 、法向黏结力 $200\text{ MN}\cdot\text{m}^{-1}$ 、法向黏结刚度 $10\text{ GN}\cdot\text{m}^{-2}$ 、法向摩擦角 0 、破断力 42 kN 。其中垫片的物理力学参数为: 弹性模量 150 GPa 、泊松比 0.2 、厚度 0.01 m 、法向刚度 $0.8\text{ GN}\cdot\text{m}^{-3}$ 、剪切刚度 $0.8\text{ GN}\cdot\text{m}^{-3}$ 。为模拟螺母的固定作用, 需将 Liner 与改进 Pile 结构单元间的 Link 进行固定^[17]。

为验证模拟结果的可靠性, 将锚固角度 45° 时的模拟结果与 Srivastava 试验中 T2 材料 45° 试件的试验结果^[9] 进行对比分析。由表 1 两者结果对比可知, 模拟结果与试验结果基本一致, 表明所建模型能够较好地模拟锚杆在拉剪载荷作用下的承载性能以及屈服破断过程。

表 1 本研究数值模拟与 Srivastava 试验结果对比
Table 1 Comparison of numerical simulation in this study with test results of Srivastava

结果归属	峰值强度/MPa	弹性模量/MPa
本研究模拟	9.52	1 210
Srivastava 试验 ^[9]	9.57	1 230

2 数值模拟结果分析

2.1 试件变形与强度特性分析

图 3(a)为不同锚固角度条件下试件的应力-应变曲线,由图可知,试件应力-应变曲线的变化趋势具有明显的阶段特征。为具体分析试件应力-应变曲线不同阶段的变化特征,以锚固角度为 75° 时的模拟结果为例进行分析,如图 3(b)所示。

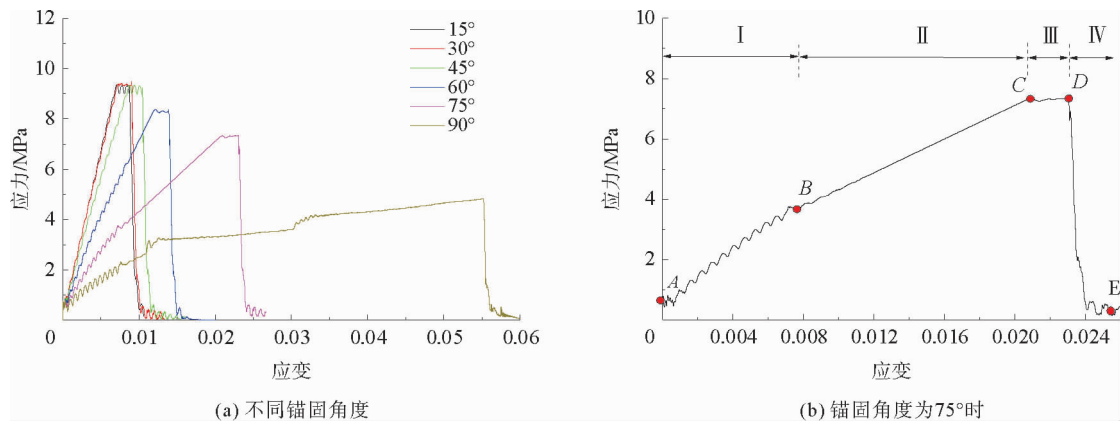


图 3 试件压缩应力-应变曲线

Fig. 3 Compression stress-strain curves of specimens

由图 3(b)可知,试件的整个加载过程大致可分为 4 个阶段:第 I 阶段,由应力-应变曲线上的 A 点到 B 点,该阶段为初始阶段,试件刚开始加载,此时锚杆轴力与剪切力共同发挥抗剪作用,该阶段的应力-应变曲线斜率较大;第 II 阶段,由应力-应变曲线上的 B 点到 C 点,该阶段为剪力屈服阶段,试件已发生较大的变形,锚杆发生剪力屈服^[16],此时,锚杆上塑性铰形成,锚杆剪切不再增大,但锚杆轴力仍可继续增大,由此可知该阶段内主要是锚杆轴力发挥抗剪作用,应力-应变曲线斜率有所减小;第 III 阶段,由应力-应变曲线上的 C 点到 D 点,该阶段为轴力屈服阶段,在达到峰值后,锚杆发生屈服,其所发挥的抗剪力达到极值不再继续增大,但此时锚杆并未发生破断,锚杆仍继续发挥作用,因此该阶段内的应力-应变曲线几乎保持不变;第 IV 阶段,由应力-应变曲线上的 D 点到 E 点,该阶段为破断阶段,随着锚杆变形的进一步增大,应变到达 D 点后,锚杆发生破断,试件的应力迅速跌落。

由图 3(a)可知,模拟结果中当锚固角小于 45° 时,试件的应力-应变曲线没有第 II 阶段,这是由于锚杆此时主要发生拉伸变形,剪切变形较小,锚杆不容易发生剪切屈服。而在锚固角大于 45° 后,锚杆剪切变形逐渐变成主要变形,锚杆容易发生剪切屈服,因此会增加一个剪切屈服阶段。

由图 3(a)还可知,锚固角对试件的峰值强度以及弹性模量影响较大,为定量分析锚固角度对试件峰值强度以及弹性模量的影响规律,统计了不同锚固角度条件下试件的峰值强度以及弹性模量,如图 4 所示。由图 4 可知,与锚杆垂直安装(锚固角 90°)相比,倾斜安装锚杆更能提高结构面试件的强度。锚固角分别为 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° 时,试件峰值强度分别为 9.35、9.37、9.34、8.38、7.36、4.51 MPa,相比锚固角 90° 时,锚固角由 15° 增大至 75° 时,分别提高了 51.7%、51.9%、51.7%、46.1%、38.6%。当锚固角为 30° 时,试件峰值应力最大,随着锚固角的增加,峰值应力先恒定后减小,其中当锚固角小于 45° 时,试件峰值应力变化不大,峰值应力曲线基本恒定,而在锚固角大于 45° 后,试件峰值应力变化显著,峰值曲线减小速率为 $0.111 \text{ MPa} \cdot (^\circ)^{-1}$,这主要是由于锚杆受力以及发挥抗剪力贡献值大小的影响,将在第 3 部分具体分析。

由图 4 可知,当锚固角为 90°时,试件弹性模量最小,锚固角分别为 15°、30°、45°、60°、75°、90°时,试件弹性模量为 1.58、1.50、1.21、0.82、0.66、0.51 GPa,相比锚固角 90°时,锚固角从 15°增大至 75°时,分别提高了 67.5%、66.0%、58.0%、37.8%、23.3%。随着锚固角的增大,试件弹性模量呈非线性降低,锚固角低于 30°时,弹性模量曲线减小速率为 0.005 GPa·(°)⁻¹;锚固角从 30°增大至 60°时,弹性模量曲线减小速率为 0.023 GPa·(°)⁻¹;锚固角从 60°增大至 90°时,弹性模量曲线减小速率为 0.010 GPa·(°)⁻¹。由此可以看出,在锚固角从 30°到 60°时,试件弹性模量变化最快,其次是 60°到 90°,15°到 30°变化最小。

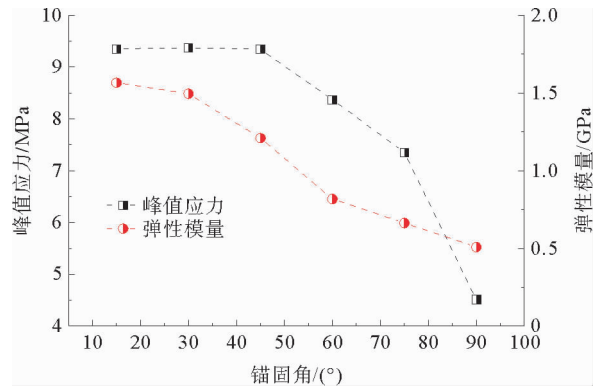


图 4 锚固角-峰值应力及锚固角-弹性模量曲线
Fig. 4 Curves of anchor angle-peak strength and anchor angle-elastic modulus

2.2 锚杆-围岩相互作用特征分析

在荷载作用下,锚杆和围岩之间相互作用,在加载过程中不仅锚杆的变形和受力不断演化,围岩的受力和破坏状态也在不断发生变化。整个锚固体系的内在作用机制十分复杂,为探究锚固结构面试件加载过程中锚杆-围岩的相互作用关系,以锚固角 45°时的模型为例,对试件的变形和受力进行分析。

图 5 为试件加载过程中试件表面的水平位移曲线以及加载过程中试件的位移场分布图。由图 5 可知,锚杆破断前后,试件的水平位移曲线增长趋势相差较大。在锚杆破断前,在锚杆的锚固作用下,试件水平变形缓慢,且水平变形曲线大致呈线性增长趋势;而在锚杆破断后,由于失去锚杆的锚固作用,试件中累计的弹性能迅速释放,因此试件水平变形迅速增大,之后增长速率又逐渐降低,水平变形曲线大致呈幂函数的非线性增长趋势。由此可见,整个加载过程中,锚杆对结构面试件的变形控制作用明显,直到锚杆破断。锚杆破断后,试件的变形不再受锚杆的影响,其位移场的分布较为均匀,如图 5 中右上角的试件位移分布图所示。

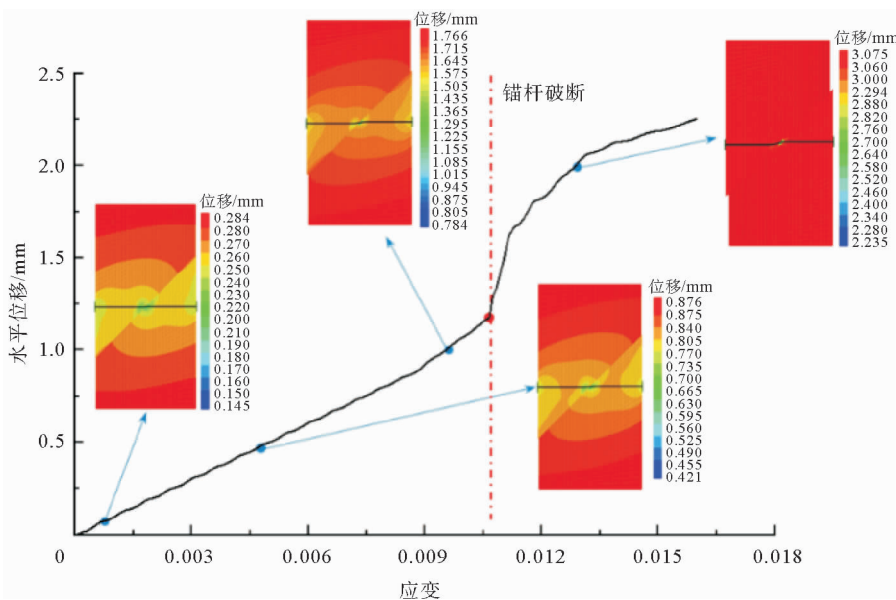


图 5 锚固结构面试件水平位移曲线及加载过程中位移分布图
Fig. 5 Horizontal displacement curve and displacement distribution during the loading process of bolted rock joint specimen

由图 5 试件位移图可知,试件两端的位移最大,中间最小,这是由于锚杆对试件位移的限制所造成的。由图 5 可知,锚杆对试件位移的限制主要分布在两个位置:其一为锚杆与结构面交叉区域,这时锚杆的变形主要集中在结构面附近,该部分锚杆-围岩相互作用明显,对试件结构面处的位移影响较大;其二为锚杆两端,即在试件表面安装螺母垫片区域,这是因为锚杆的轴力主要通过螺母垫片向试件传递,该处受到锚杆较大的拉力,因此变形受到较大的限制作用。

图 6 统计了锚固角为 45°时模型在加载过程中的水平应力分布,其中水平应力正值表示拉应力,负值表示压应力。由图 6 可知,锚杆与试件力的相互作用主要分布在两个位置:其一为结构面与锚杆相交处,其二为锚杆两端安装螺母垫片处。在锚杆破断前,试件所受最大水平应力主要集中在锚杆两端,且随着加载的进行,试件所受最大水平应力不断增大,当应变从 0.001 6 增大到 0.009 6 时,最大水平应力由 11.2 MPa 增至 60.1 MPa。在锚杆破断后,锚杆两端不再与试件相互作用,此时破断后的锚杆仍继续与结构面相互作用,试件水平应力主要集中在锚杆与结构面相交处,但其值较小,仅为 11 MPa 左右。

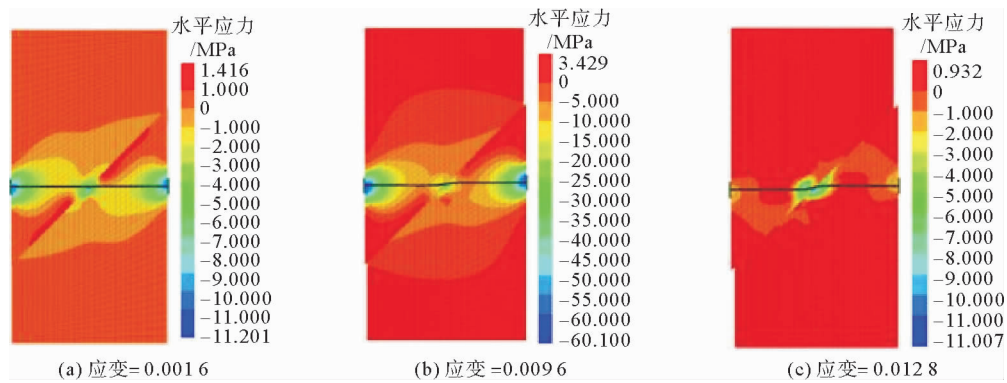


图 6 锚固结构面试件水平应力分布图

Fig. 6 Horizontal stress distribution of the bolted rock joint specimen

2.3 锚杆受力分析

锚杆的受力特征决定了其对结构面提供的抗剪作用,但由于锚杆的受力受锚固体系中复杂的非线性力学行为的影响^[18],理论计算极为复杂。目前室内试验中所使用的监测方法无法直接对锚杆的锚杆剪力、轴力和弯矩等力学特征参数进行监测。因此,数值模拟成为揭示锚杆受力分布及其演化特征的一种有效手段。以锚固角 45°条件下的锚固结构面试件为例,当试件应变为 0.008 0 时,锚杆的剪力、轴力及弯矩如图 7 所示,图中正负值代表各物理量的方向。

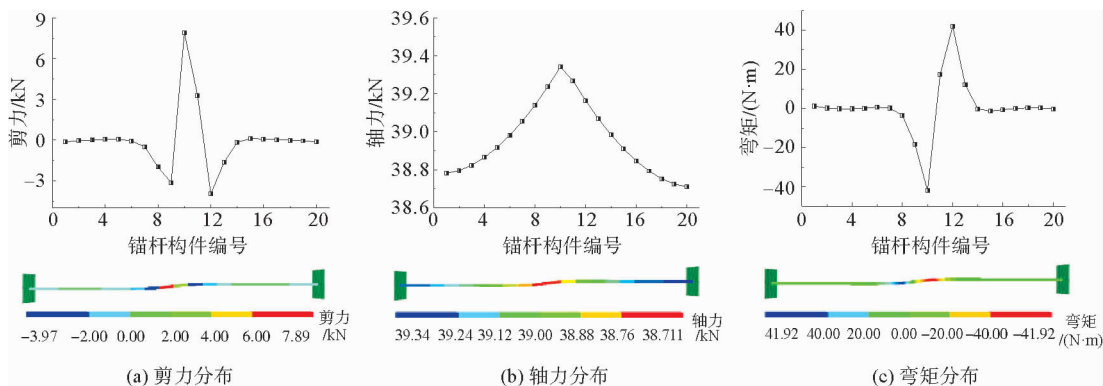


图 7 锚杆剪力、轴力及弯矩分布规律

Fig. 7 Distribution pattern of shear force, axial force and bending moment of bolt

由图 7(a)可知,锚杆剪力呈“中间高、两边低”分布,锚杆剪力在节理面处最大,为 7.89 kN,然后沿远离节理面方向先逐渐减小到-3.97 kN,之后再增大到 0,而后剪力基本维持在 0 左右。由图 7(b)可知,锚杆轴力分布也呈“中间高,两边低”的形态,锚杆在节理面处的轴力高于锚杆两端的轴力,与锚杆剪力不同的是,锚杆轴力沿远离节理面方向单调减小,但整体上轴力相差不大。这是由于模型尺寸较小,锚杆较短,所以轴力相差不大。由图 7(c)可知,锚杆弯矩呈斜对称的波浪形状分布。锚杆弯矩在节理面附近处最小,为 0,沿远离节理面方向先逐渐增大至屈服点处达到最大值(41.92 N·m),然后又不断减小至 0 左右,而后弯矩基本维持在 0 左右。以上监测结果还说明,锚杆的变形和受力主要分布在结构面附近,范围大致为锚杆直径的 3~4 倍^[18]。

为进一步分析锚固角对锚杆受力的影响规律,对不同锚固角条件下,试件加载过程中锚杆的轴力及剪力进行监测,结果如图 8 所示。由图 8(a)可知,随着试验的进行,锚杆轴力呈线性增大直到最大值 42.0 kN,然后保持恒定直到锚杆破断后,锚杆轴力降为 0。随着锚固角的增大,轴力-应力曲线斜率减小,表明锚固角越小,相同应变条件下锚杆发挥的轴力越强。由图 8(b)可知,随着试验的进行,锚杆剪力呈非线性增大,然后基本保持恒定直到锚杆破断后,锚杆剪力降为 0。锚固角不同,锚杆最大剪切不同,整体上为随着锚固角的增大,锚杆最大剪力增大,即锚固角越大,锚杆发挥的抗剪作用越强,这主要是由锚杆的剪切屈服所致。锚杆的剪切屈服是由锚杆轴力和剪力共同作用的结果,具体表达式^[19]为:

$$\sigma_y = \frac{M}{W} + \frac{N}{A}, \tag{1}$$

$$M = \frac{Q^2}{2P_u}. \tag{2}$$

式中: σ_y 为锚杆的屈服应力; M 为锚杆塑性铰处的弯矩; N 为锚杆在结构面处的轴力; W 为锚杆节理静距, $W = \frac{\pi d^3}{32}$, d 为锚杆直径; A 为锚杆横截面积; Q 为锚杆在结构面处的剪力; P_u 为锚杆周围围岩产生的单位长度极限反力, $P_u = n\sigma_c d$, n 为反力系数、一般在 1~15 之间取值, σ_c 为围岩单轴抗压强度。

由式(1)可知,对同一锚杆而言,当锚杆发生屈服时,锚杆轴力越大,弯矩越小;而由式(2)可知,锚杆的弯矩与锚杆的剪力呈正相关,即锚杆轴力越大,锚杆屈服时的剪力越小。由上文分析可知,在相同应变条件下,锚固角越大锚杆发挥的轴力越小,即当锚固角越大时,锚杆屈服时的最大剪力越大。

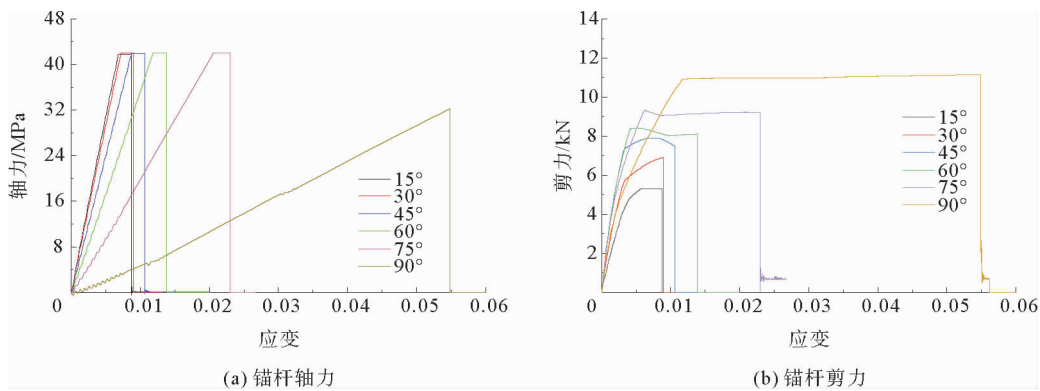


图 8 不同锚固角条件下锚杆轴力和剪力曲线

Fig. 8 Axial force and shear force curves of bolts under different anchor angle conditions

3 锚杆抗剪力演化特征

锚杆的抗剪力主要由锚杆的轴力和剪力共同组成。因此,锚杆抗剪力可拆分为锚杆轴力的贡献值 T_a 和锚杆剪力的贡献值 T_s 。

$$T_n = N(\cos(\theta - \beta) + \mu \sin(\theta - \beta)) , \tag{3}$$

$$T_s = Q(\sin(\theta - \beta) - \mu \cos(\theta - \beta)) . \tag{4}$$

式中： θ 为锚杆与结构面的夹角，即锚固角； μ 为结构面摩擦系数； β 为结构面处锚杆发生挠曲变形后所在直线与变形之前所在直线的夹角，即转角^[7]； N 为结构面处锚杆轴力； Q 为结构面处锚杆剪力。

为分析锚固角度对锚杆轴力的贡献值、锚杆剪力的贡献值以及抗剪力的影响规律，将式(3)~(4)编写成 FISH 语言融入主程序中，对试件加载过程中锚杆轴力的贡献值、锚杆剪力的贡献值以及抗剪力进行监测，监测结果如图 9 所示。由图 9(a)可知，锚杆轴力贡献值曲线增长趋势同锚杆轴力曲线一致。随着锚固角的增大，锚杆轴力的最大贡献值降低，当锚固角从 15°增至 90°时，锚杆轴力最大贡献值分别为 42.88、40.84、36.87、28.73、19.49、7.02 kN。由图 9(b)可知，锚杆剪力贡献值曲线增长趋势同锚杆剪力曲线一致。随着锚固角的增大，锚杆剪力的最大贡献值增大，当锚固角分别为 15°、30°、45°、60°、75°、90°时，锚杆剪切力最大贡献值分别为 0.28、2.18、4.40、7.06、8.51、11.14 kN。由图 9(c)可知，锚杆抗剪力曲线增长趋势同锚固结构面应力曲线一致。随着锚固角的增大，锚杆抗剪力整体上呈减小趋势，当锚固角从 15°增大到 90°时，锚杆剪切力最大贡献值分别为 43.16、43.02、41.23、35.79、27.90、18.11 kN。

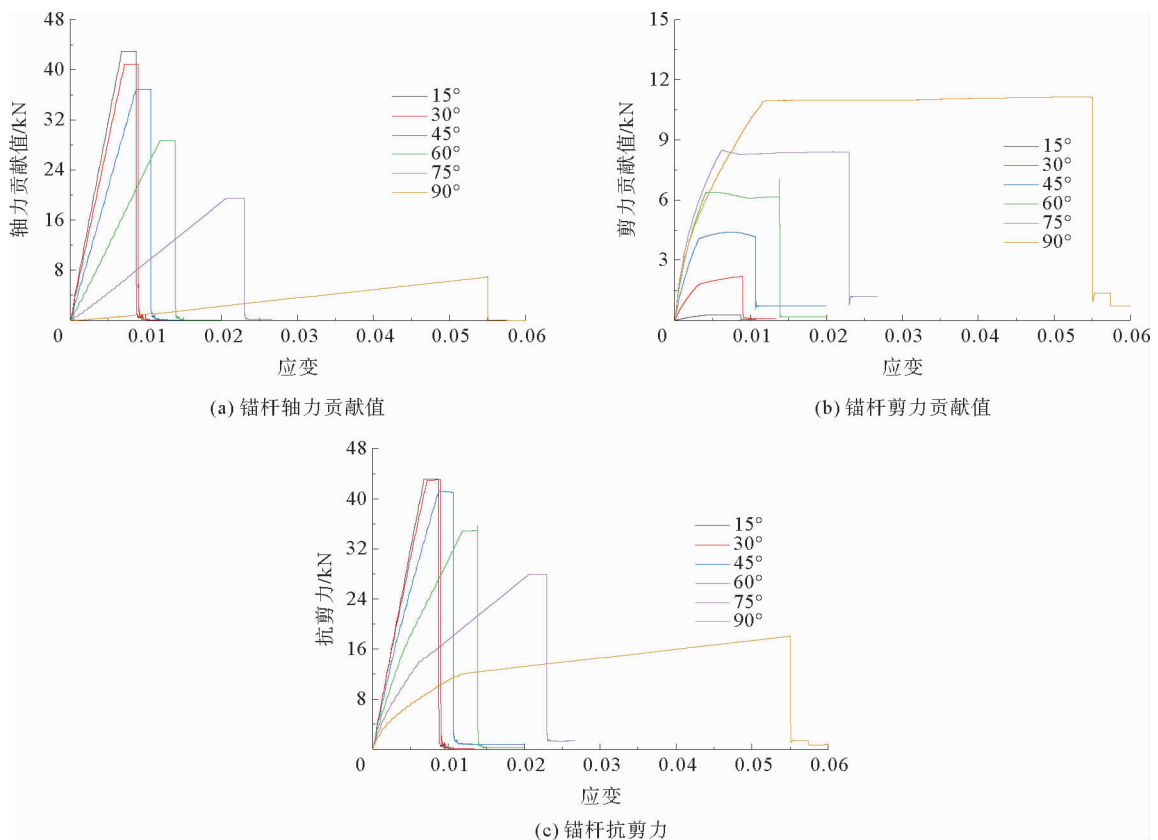


图 9 锚杆轴力贡献值、剪力贡献值及锚杆抗剪力曲线

Fig. 9 Curves of axial force contribution value, shear force contribution value and shear resistance of bolts

为进一步分析锚固角对锚杆轴力贡献值、锚杆剪力贡献值及锚杆抗剪力的影响，统计了不同锚固角条件下，锚杆轴力最大贡献值、锚杆剪力最大贡献值以及锚杆抗剪力最大值，如图 10 所示。由图 10 可知，相较于锚杆剪力的贡献，锚杆轴力的贡献更大，尤其是在锚固角较小时。随着锚固角的增大，锚杆轴力的贡献呈非线性减小，锚固角小于 45°时曲线减小速率较小，而在锚固角大于 45°时，曲线减小速率较大。锚杆剪力的贡献随着锚固角的增大呈线性增大。这是由于锚杆轴力的贡献占主要地位，锚杆抗剪力随锚固角增大的变化趋势大致同锚杆轴力贡献值曲线一致。

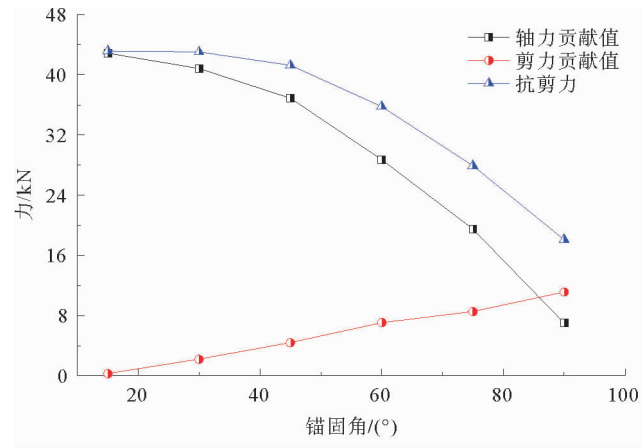


图 10 锚杆轴力贡献值、锚杆剪力贡献值及锚杆抗剪力-锚固角曲线

Fig. 10 Curves of axial force contribution value, shear force contribution value and shear resistance-anchor angle of bolts

4 结论

1) 锚固角大于 45° 时, 锚固结构面试件加载过程分为初始阶段、剪力屈服阶段、轴力屈服阶段以及破断阶段 4 个阶段; 锚固角小于 45° 时, 锚固结构面试件加载过程中无剪力屈服阶段。

2) 与垂直锚杆(锚固角 90°) 相比, 倾斜锚杆能提高结构面试件的强度。随着锚固角的增加, 试件的峰值应力整体上先恒定后减小, 试件的弹性模量呈非线性降低。

3) 锚杆与试件力的相互作用主要分布在结构面与锚杆相交处以及锚杆两端安装螺母垫片处, 这两处试件的受力较大、变形较小, 锚杆的显著变形和受力主要分布在结构面附近。

4) 相较于锚杆剪力的贡献, 锚杆轴力的贡献更大。随着锚固角的增大, 锚杆轴力的贡献呈非线性减小, 锚杆剪力的贡献呈线性增大, 锚杆抗剪力也呈非线性减小。

参考文献:

- [1] 康红普. 我国煤矿巷道锚杆支护技术发展 60 年及展望[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 11(6): 1072-1081.
KANG Hongpu. Sixty years development and prospects of rock bolting technology for underground coal mine roadways in China[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 11(6): 1072-1081.
- [2] 杨仁树, 李永亮, 王茂盛, 等. 预应力锚索剪切力学特性试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(6): 1166-1174.
YANG Renshu, LI Yongliang, WANG Maosheng, et al. Experimental study of shear mechanical properties of prestressed cable bolts[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(6): 1166-1174.
- [3] 肖鹏, 于海洋, 王东, 等. 充填开采超前段主动支护替代被动支护技术与应用[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41(3): 41-49.
XIAO Peng, YU Haiyang, WANG Dong, et al. Technology and application of active support replacing passive support in advance section of backfill mining [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2022, 41(3): 41-49.
- [4] 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.
- [5] 李国锋, 王九红, 刘建荣, 等. 巷道围岩锚固结构面剪切特性与破坏特征研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41(4): 47-55.

- LI Guofeng, WANG Jihong, LIU Jianrong, et al. Study on shear properties and failure characteristics of bolted joint of roadway surrounding rock[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2022, 41(4): 47-55.
- [6] 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.
- [7] 黎海滨, 谭捍华, 袁维, 等. 剪切方向与锚杆倾向共面条件下的锚固机制研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(增 2): 1-11.
LI Haibin, TAN Hanhua, YUAN Wei, et al. The anchorage mechanism under the coplanar condition of shear direction and bolt inclination[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(S2): 1-11.
- [8] 周辉, 徐荣超, 张传庆, 等. 预应力锚杆锚固止裂效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(10): 2027-2037.
ZHOU Hui, XU Rongchao, ZHANG Chuanqing, et al. Experimental study of crack prevention effect of pre-stressed bolt anchoring[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(10): 2027-2037.
- [9] SRIVASTAVA L P, SINGH M. Empirical estimation of strength of jointed rocks traversed by rock bolts based on experimental observation[J]. Engineering Geology, 2015, 197: 103-111.
- [10] 赵同彬, 程康康, 魏平, 等. 含弱面岩石滑移破坏及锚固控制试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(6): 1081-1087.
ZHAO Tongbin, CHENG Kangkang, WEI Ping, et al. Study on slip failure of rock with weak plane and anchorage control mechanism[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(6): 1081-1087.
- [11] 武东阳, 蔚立元, 苏海健, 等. 单轴压缩下加锚裂隙类岩石试块裂纹扩展试验及 PFC^{3D} 模拟[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1681-1692.
WU Dongyang, YU Liyuan, SU Haijian, et al. Experimental study and PFC^{3D} simulation on crack propagation of fractured rock-like specimens with bolts under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(6): 1681-1692.
- [12] 陈森. 断续节理岩体破坏力学特性及锚固控制机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019;
CHEN Miao. Study on the mechanical failure behavior and anchoring control effect of non-persistent jointed rock[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [13] 栾恒杰, 曹艳伟, 蒋宇静, 等. 锚杆拉剪耦合失效模式在 FLAC^{3D} 中的实现与应用[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(6): 5-15.
LUAN Hengjie, CAO Yanwei, JIANG Yujing, et al. Implementation of tension-shear coupling failure mode of rock bolts in FLAC^{3D} and its application[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(6): 5-15.
- [14] 宋远霸, 闫帅, 柏建彪, 等. FLAC^{3D} 中锚杆剪切破坏失效的实现及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(8): 1899-1909.
SONG Yuanba, YAN Shuai, BAI Jianbiao, et al. Implementation of shear broken failure of bolts in FLAC^{3D} and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(8): 1899-1909.
- [15] 陈文强, 赵宇飞, 周纪军. 考虑受压侧岩体反力非线性作用的锚杆抗剪理论[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1662-1668.
CHEN Wenqiang, ZHAO Yufei, ZHOU Jijun. Shear resistance theory of bolt considering nonlinear behaviour of grout reaction force[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(5): 1662-1668.
- [16] JIANG Y, ZHANG S, LUAN H, et al. Numerical modelling of the performance of bolted rough joint subjected to shear load[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2022, 8(5): 1-21.
- [17] 王晓卿. 对拉锚杆、锚索的承载特性与加固效果分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(增 2): 430-438.
WANG Xiaoqing. Analysis for bearing characteristics and reinforcement effect of counter-pulled bolts and cables[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(S2): 430-438.
- [18] 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.
- [19] PELLET F, EGGER P. Analytical model for the mechanical behaviour of bolted rock joints subjected to shearing[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1996, 29(2): 73-97.

(责任编辑:吕海亮)