

基于颗粒离散元法的岩体结构面锚固机理细观研究

袁康^{1,2}, 蒋宇静^{1,2}, 初振云^{1,2}, 王刚^{1,2,3}, 公彬^{1,2}

(1. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 山东省矿山灾害预防控制重点实验室, 山东 青岛 266590;

3. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590)

摘要:为了研究锚杆加固节理岩体的锚固机理,借助颗粒离散元软件 PFC^{2D} 软件内嵌 FISH 语言分析了加载过程中锚杆和结构面之间的相互作用机理以及锚杆内部轴向和剪切应力情况,探讨了锚杆对结构面锚固效应和锚杆的变形破坏规律。结果表明,锚杆在剪切荷载作用下容易在结构面和锚杆交界位置发生“S”形变形并在节理面两侧形成塑性铰,导致锚杆在塑性铰处发生拉弯屈服,揭示了锚杆在剪切作用下的拉弯屈服机制,并从细观机制上阐明了锚杆对岩体结构面的支护作用主要体现为结构面内聚力的提高。

关键词:离散元法;剪切试验;岩石节理面;变形分析;受力分析;拉弯屈服;锚固机理

中图分类号: TU458; TD31

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2014)06-0076-09

Microscopic Research on Anchorage Mechanism of Bolted Rock Joint Based on DEM

Yuan Kang^{1,2}, Jiang Yujing^{1,2}, Chu Zhenyun^{1,2}, Wang Gang^{1,2,3}, Gong Bin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

3. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Focusing on the microscopic anchoring mechanism of bolt in jointed rock mass, a discrete element method-based research program was carried out to account for the microscopic interaction mechanism between the rock bolt and the joint during the loading process as well as the axial and the shear forces mobilized in the bolt. With the inner-embed FISH language in PFC, the deformation and stress characteristics of bolt in different deformation capacity were analyzed from the point of microcosmic. The results show that the shearing performance of rock joint anchored by bolt can be strengthened mainly because of the enhancement of cohesion; the bolt partly was deformed into “S” shape near the bolt-joint intersection. There exist two critical points in the loading process: one is in the bolt-joint intersection and the other at the plastic hinge point. The axial stress in bolt maximizes at the plastic hinge point, which will result in tension-bending yielding phenomenon near the plastic hinge.

Key words: discrete element method (DEM); shear test; rock joint; deformation analysis; force analysis; tension-bending yielding; anchoring mechanism

收稿日期: 2014-02-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279097, 51479108, 51379117); 山东省教育厅高等学校科技计划项目(J11LE03); 山东科技大学创新团队建设计划项目; 山东省自然科学基金项目(ZR2012EEM010)

作者简介: 袁康(1989—), 男, 山东汶上人, 硕士研究生, 主要从事岩土力学方面的研究工作。E-mail: 973651331@qq.com
王刚(1976—), 男, 山东阳谷人, 副教授, 博士, 主要从事岩石力学与工程方面的科研与教学工作, 本文通信作者。E-mail: wanggang1110@gmail.com

节理普遍存在于岩体中,岩体的稳定性在很大程度上取决于节理面的力学性质。20 世纪 60 年代以来,对岩石节理剪切行为的研究一直是国内外学者的研究重点,并取得了很多研究成果^[1-9]。由于锚杆对加固围岩和改善围岩强度具有十分明显的作用,并且可以限制块体间的层间错动或滑移,提高岩体的稳定性,尤其是全长黏结锚杆,作为一种主要的锚杆支护形式,凭借其高可靠性和经济性现已被广泛地应用于节理岩体的锚固领域。因此,研究节理岩体的锚固机理具有重要的实践意义。然而,由于岩体的各向异性和节理发育的复杂性,锚杆加固节理岩体的机制非常复杂,国内外学者对此进行了大量研究和探索。

国外方面,Sten^[10]在 1974 年对嵌入花岗岩块体中的全长水泥砂浆锚杆进行剪切试验,研究了锚杆对节理面抗剪强度的影响。Spang 等^[11]研究了剪切过程中锚杆的变形,发现变形后锚杆中两个奇异点,一个在锚杆与节理面交叉处,另一个在节理面两侧的塑性铰处。Egger 等^[12]指出锚杆在节理锚固中的工作机理是作为附加的抵抗力来抵抗沿着节理的剪切破坏,锚杆只在靠近节理附近的位置产生变形。Ferrero^[13]通过试验和数值模拟及理论分析对锚固节理中锚杆的销钉作用和由于锚杆变形产生的轴向力对抗剪性能的影响进行分析,并据此提出锚杆失效机理的分析模型。Pellet 等^[14]根据加锚节理剪切过程中的轴力和剪力特征以及锚杆的变形特征,提出了一种新的锚杆失效机制的分析模型,建立了锚杆倾角、锚杆的力学性质岩石强度等与锚固节理抗剪强度的关系。Aziz 等^[15]通过室内双剪试验装置和 ANSYS 有限元软件研究了灌浆体厚度对锚杆-浆体-混凝土基体相互作用的影响和对锚杆弯曲行为的影响。Jalalifar 等^[16]采用 5 种不同类型的锚杆进行双剪试验和数值模拟,研究锚杆的受力和破坏机制。

我国学者也在节理面锚固机理方面进行了大量研究。葛修润等^[17]通过加锚节理岩体进行抗剪性能的室内模拟试验和理论分析,着重探讨了锚杆对节理面抗剪性能的影响,以及杆体阻止节理面相对错动的“销钉”作用机制,并提出改进的估算加锚节理面的抗剪强度公式。刘波^[18]对加锚节理锚杆横向作用进行系统的物理试验,对锚杆的横向效应和剪切过程中的综合抗力进行研究。杨松林等^[19]提出定量评价锚杆对节理加固作用的理论公式,并利用提出的公式研究影响锚杆加固作用的一些重要因素。温进涛等^[20]对含结构面岩体的锚索锚固机理做了室内模拟试验研究,并监测了锚索加载过程中的受力变化情况。程东幸等^[21]对锚固节理岩体的等效力学参数进行研究,指出锚固使得节理面的内聚力有较大提高。宋宏伟^[22]利用数值分析软件 ANSYS 研究了锚杆的横向作用机理,分析了加锚非连续岩体与锚杆的错动变形和受力规律。刘爱卿等^[23]通过 FLAC^{3D}软件着重研究了围岩强度、锚杆以及预应力对节理面抗剪性能的影响。

分析可知,现有的成果主要是从宏观层面利用物理试验和数值模拟技术对锚固结构面的力学行为和变形特性进行研究,在一定程度上揭示了结构面的锚固机理,但鲜有成果对锚固节理面进行细观研究,而细观机制是宏观性质的物质基础。因此,开展结构面锚固机理的细观研究具有重要的理论价值和实践意义。本研究采用离散元软件颗粒流程序 PFC^{2D}对加锚岩体节理面的力学响应进行分析,主要从细观层面对锚杆的变形特征和受力特点进行分析,研究锚杆锚固节理面的细观机理和宏观性质。

1 颗粒流程序简介

PFC(Particle Flow Code)^[24]是由 Itasca 公司开发的商业离散元软件,现已被广泛用于岩石力学问题的研究。PFC 采用颗粒集体表征介质,以牛顿第二定律和力与位移的关系为基础,可以模拟圆形颗粒的运动与相互作用问题,也可以通过两个或多个颗粒与其直接相邻的颗粒连接形成任意形状的组合体来模拟块体结构问题。颗粒单元被视为刚性体,它们之间的相互作用是通过接触产生的,其相互作用的本构模型包含三种:接触刚度模型、滑动模型和黏结模型。PFC 模型体系的组成情况如图 1 所示。

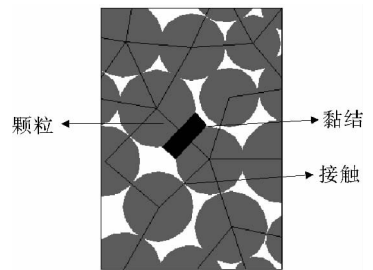


图 1 PFC 模型体系

Fig. 1 Model system of particle flow code

2 加锚节理岩体的颗粒流剪切试验模拟

2.1 岩石材料细观参数的选取

加锚节理岩体的剪切模型中岩石试件细观参数的选取至关重要,关系到模拟结果的准确性和可靠性。剪切试验进行前,先通过一系列双轴压缩数值模拟试验来反演模拟岩石细观参数。压缩试验数值模型与实际物理试验中试样尺寸大小一致,采用的数值试样细观力学参数见表 1^[25]。

2.2 加锚岩石节理直剪试验模型

加锚岩石节理面剪切数值模型采用 PFC^{2D} 程序进行。模型尺寸为 100 mm×50 mm,包含上下块岩石、灌浆体以及节理面和锚杆,总计 2 921 个颗粒。岩石选用表 1 中的参数,灌浆体在原来岩石参数的基础上将平行黏结强度变为 40 MPa,节理面是由未经黏结的圆形颗粒通过软件命令生成,其平行黏结刚度和平行黏结强度大小设置为 0。锚杆采用平行黏结模型,因为平行黏结模型既可以传递力,也可以传递弯矩。平行黏结强度设为 300 MPa,平行黏结刚度设为 2×10^{11} , 4×10^{11} 和 8×10^{11} Pa/m,分别采用代表延伸率为 32%,16% 和 8% 的锚杆。模型外部的剪切盒由 wall 单元组合构成,其中 6# 墙体作为剪切加载墙,而 1#,5#,6# 墙体单元共同构成下部主动剪切盒,使得模型在水平方向运动。上部剪切盒水平方向固定,只有 2# 墙体可以上下运动,而且 2# 墙体作为伺服墙体,对模型施加恒定的法向荷载。完整模型如图 2 所示:浅灰色细颗粒代表岩体,中间 10 个互相外切的浅灰色颗粒代表锚杆,锚杆周围的深灰色颗粒代表灌浆体,黑色的颗粒代表节理面。

剪切试验采用伺服加载、应变控制的方式进行,2# 墙体作为伺服墙体通过伺服机制对模型施加恒定法向荷载,并把其垂直方向的位移作为法向位移;通过对模型下部左端的 6# 墙体单元施加恒定的加载速率并将其水平位移作为剪切位移来实现对模型的剪切;以 5#,6# 墙体单元受到的水平方向不平衡力除以节理面的水平投影面积作为平均剪切应力,当试件的剪切位移达到预设值时试验终止,剪切过程中动态记录试件的剪切应力、法向位移、锚杆的受力、锚杆颗粒的位移变化以及裂纹的位置、类型和数目等情况。

为研究锚固节理面在剪切荷载作用下的力学响应和锚杆对节理面加固的细观锚固机理,进行了不同法向应力作用下的加锚节理剪切数值模拟以及未锚固节理的直剪数值模拟。

3 结果分析

3.1 节理面抗剪性能分析

不同法向应力作用下,分别对数值模型进行无锚和加锚条件下的剪切试验,得到的剪应力-剪切位移曲线如图 3 所示。其中,在加锚模型中,采用 32% 延伸率的锚杆。由图 3 可知,加锚节理面的抗剪强度与无锚节理面相比有了很大程度的提高,而且峰值剪切位移也较无锚杆锚固的大,表现出一定的塑性强化现象^[17]。表明锚杆对节理面的锚固是有效果的,锚杆加固节理可以限制节理块体的层间错动和滑动,提高节理岩体的稳定性。锚杆支护是加固节理岩体的一种有效的工程技术措施。

表 1 岩石试样细观参数表

Tab. 1 Micro-parameters of rock sample

细观参数	参数值
最小粒径/mm	0.5
颗粒粒径比	1.66
体积密度/(kg/m ³)	1 830
颗粒模量/GPa	3.95
颗粒刚度比	1.0
摩擦系数	0.5
黏结抗拉强度/MPa	24.5±6.5
黏结抗剪强度/MPa	24.5±6.5
平行黏结模量/GPa	3.95
平行黏结刚度比	1.5
平行黏结半径因子	1.0

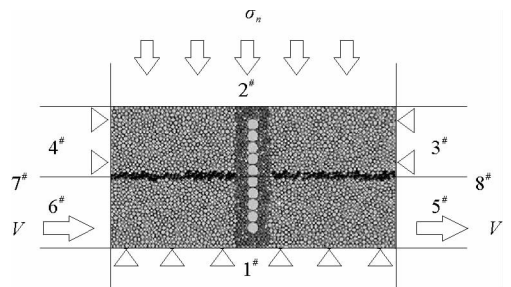


图 2 加锚节理剪切数值模型

Fig. 2 Numerical shear model of bolted joint

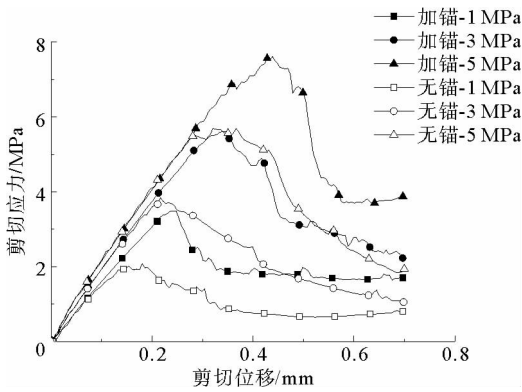


图 3 不同法向应力下的无锚和加锚节理面剪应力-剪切位移曲线

Fig. 3 Shear stress-shear displacement curves of joints with and without bolt under different normal stress

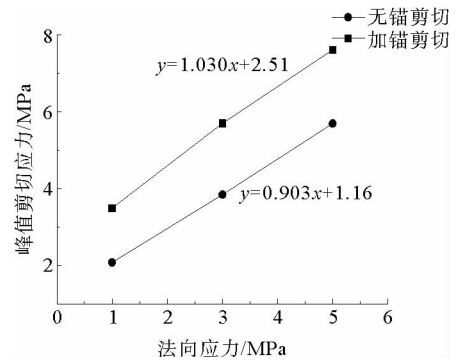


图 4 无锚和加锚节理面峰值剪应力对比

Fig. 4 Comparison of peak shear stress of joint with and without bolt

对不同法向应力条件下的峰值剪应力与法向应力进行线性拟合,如图 4 所示,可以看出:节理面的峰值剪应力与法向应力之间有很好的线性关系,加锚之后节理面的抗剪强度大幅增加。节理面没有安装锚杆锚固时,其内摩擦角约为 42° ,内聚力为 1.16 MPa,而当对节理面进行加锚锚固后,节理面的内摩擦角为 45° ,有了一定的增加,但增加幅度不大,可见,锚固后的内摩擦角提高有限;而内聚力增加到 2.51 MPa,增长的幅度较大,提高了岩体的强度。

3.2 裂纹特征分析

节理加锚剪切过程中,上下节理面之间、锚杆与周围介质之间以及介质颗粒之间都会相互作用,导致裂纹的产生。图 5 是在相同的剪切位移下的裂纹分布图,黑色的裂纹为剪切裂纹,浅色的为张拉裂纹。可见,裂纹主要出现在节理面上以及锚杆周围,由于下部节理岩体运动而上部节理岩体发生剪胀,导致下部岩体与锚杆之间的挤压过于剧烈,锚杆周围裂纹较多,且大致成“倒三角形”分布,即在锚杆与节理面交叉处向下部扩展,由于锚杆的不同变形能力,裂纹的扩展延伸深度是不一样的。锚杆的刚度较大时,裂纹能够扩展到锚杆的下部端点处,而当锚杆的刚度较小时,裂纹扩展到节理面以下 3 倍锚杆直径的深度位置。模型中裂纹的主要类型为张拉裂纹,主要是由于岩石颗粒之间以及岩石与锚杆之间的挤压造成的压制拉裂纹。剪切裂纹主要集中在锚杆与节理面交叉处并与节理面剪切方向呈 45° 夹角的线上。

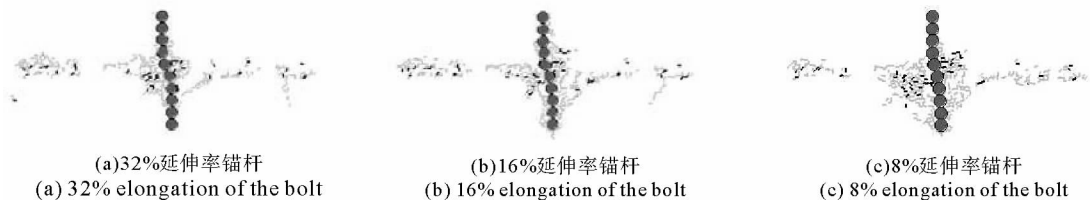


图 5 不同锚杆刚度下裂纹分布区域图

Fig. 5 Distribution of cracks in model reinforced by bolt with different stiffness

当剪切位移为 3 mm 时,模型中不同类型的裂纹数量特征如图 6 所示,可以看出,锚杆的延伸率对锚固体系中裂纹的分布和数量有很大影响。锚杆延伸率越小,则锚杆刚度越大,模型中的裂纹数目也越多。随着锚杆延伸率的减小,模型中的裂纹数量越来越多;增加的裂纹主要分布在锚杆的周围,也就是锚杆与周围介质相互挤压的位置。因此,在实际节理岩体锚固中,应该减小锚杆本身力学性能对岩体的损伤。

3.3 锚杆的变形分析

锚杆的变形与其自身刚度密切相关,表征锚杆颗粒的平行黏结的黏结刚度大,其变形所需要的力就越大,变形越不容易;相反,当平行黏结刚度较小时,其变形会比较容易。剪切一定距离后锚杆成“S”形,在经过相同

的剪切位移后,刚度越小的锚杆其弯曲角度越大,如图 7 所示。对不同延伸率的锚杆沿其长度方向的应变率进行分析,图 8 为三种不同的延伸率下的锚杆在不同的剪切位移下沿锚杆长度方向的应变率分布曲线。

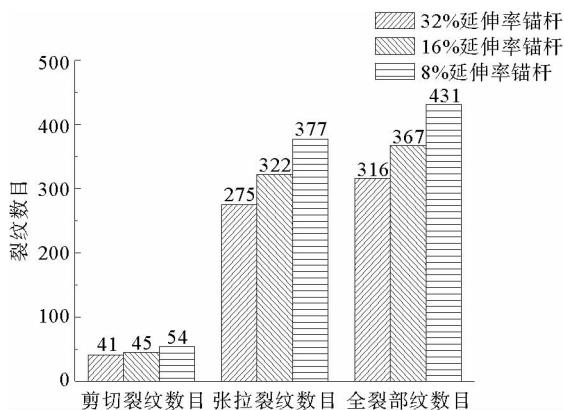


图 6 不同锚杆刚度下裂纹数目图

Fig. 6 Number of cracks in model reinforced by bolt with different stiffness

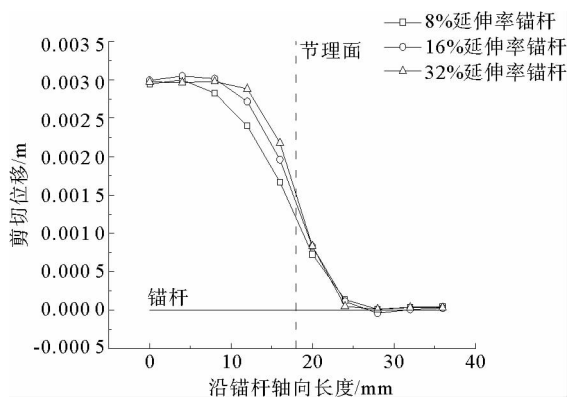
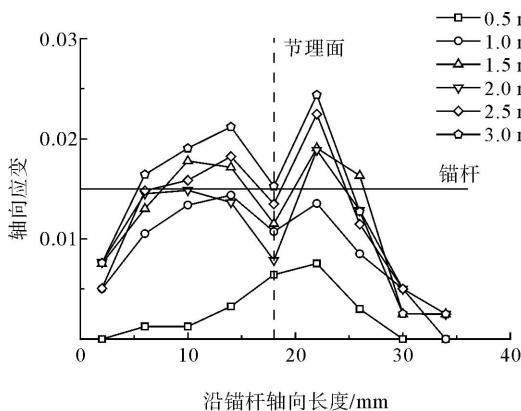
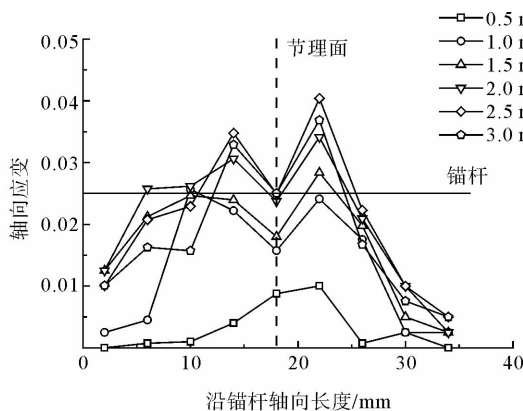


图 7 剪切位移为 3 mm 时三种锚杆的弯曲变形图

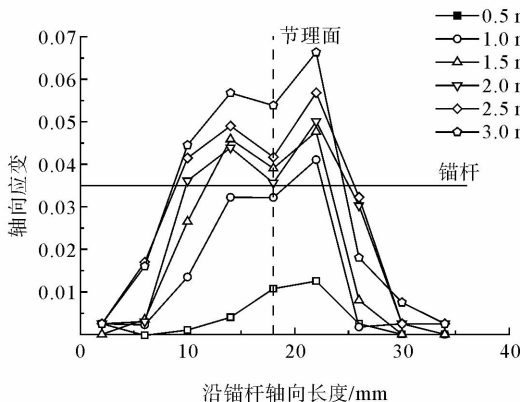
Fig. 7 Bending deformation pattern of bolts with different stiffness when shear displacement is 3 mm



(a) 8%延伸率
(a) 8% elongation of the bolt



(b) 16%延伸率
(b) 16% elongation of the bolt



(c) 32%延伸率
(c) 32% elongation of the bolt

图 8 锚杆沿轴向应变图

Fig. 8 Axial strain of bolt

可见,当剪切位移较小的时候,锚杆沿全长的应变主要集中在锚杆的中部区域,而随着剪切位移的不断 增加,由于上下岩石块体的错动,锚杆-灌浆体-岩石相互作用,锚杆沿轴向的应变逐渐增加。当超过一定的

剪切位移之后,可以看出,锚杆沿轴向的应变主要集中在靠近节理面的两侧。在相同的剪切位移下,8%延伸率锚杆的最大轴向应变约为 2.5%,而 16%延伸率和 32%延伸率锚杆的最大轴向应变分别约为 4%和 6.7%,由此可见,在剪切荷载作用下,锚杆-灌浆体-岩石相互作用下导致的锚杆沿轴向的变形与其自身的力学性质是息息相关的。锚杆自身的刚度越大,其延伸率就越小,那么轴向应变也会越小。从锚杆沿轴向应变的分布位置来看,在节理面两侧各 1 倍锚杆直径的位置处,锚杆的应变很大,形成了塑性铰^[11]。

3.4 锚杆的受力分析

由于平行黏结的受力也是遵循力与位移的关系,随着剪切位移的不断增大,黏结的受力也在不断发生着变化。图 9~11 是三种不同延伸率锚杆在不同剪切位移下的受力状态。

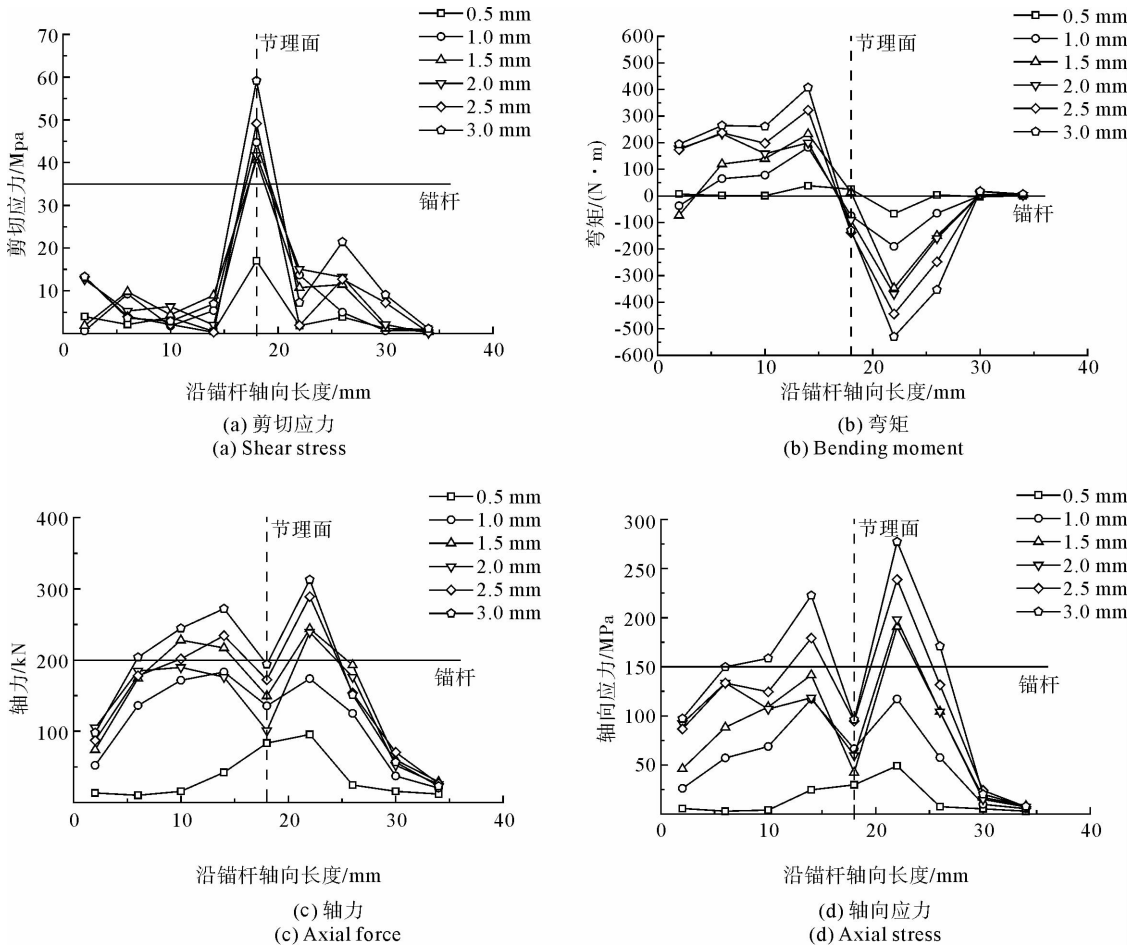


图 9 8%延伸率锚杆受力状态图

Fig. 9 Stress state along the whole length of bolt with elongation 8%

当剪切位移相同时,通过不同延伸率锚杆下的受力状态可以看出,当锚杆自身刚度较大时,其轴力、弯矩、法向应力和剪切应力都比刚度小的要大,而且刚度越大,轴力、弯矩、法向应力和剪切应力越大。

从锚杆的受力特征可以看出,锚杆与节理面交叉处轴力在很小的剪切位移时还比较大,但随着剪切位移的增加,由于锚杆的弯曲变形,在节理面两侧 1 倍锚杆直径处形成了塑性铰,锚杆与节理面交叉处的轴力小于塑性铰处的轴力。锚杆的弯矩在与节理面交叉处约为 0,在塑性铰处弯矩最大。剪切应力在锚杆与节理面交叉处最大,在塑性铰处会突然减小到约为 0。从锚杆的轴向应力可以看出,轴向应力在塑性铰处是最大的,在节理面与锚杆交叉处会有很大程度的降低。锚杆轴向应力之所以在塑性铰处最大很大程度上是由于弯矩的作用。

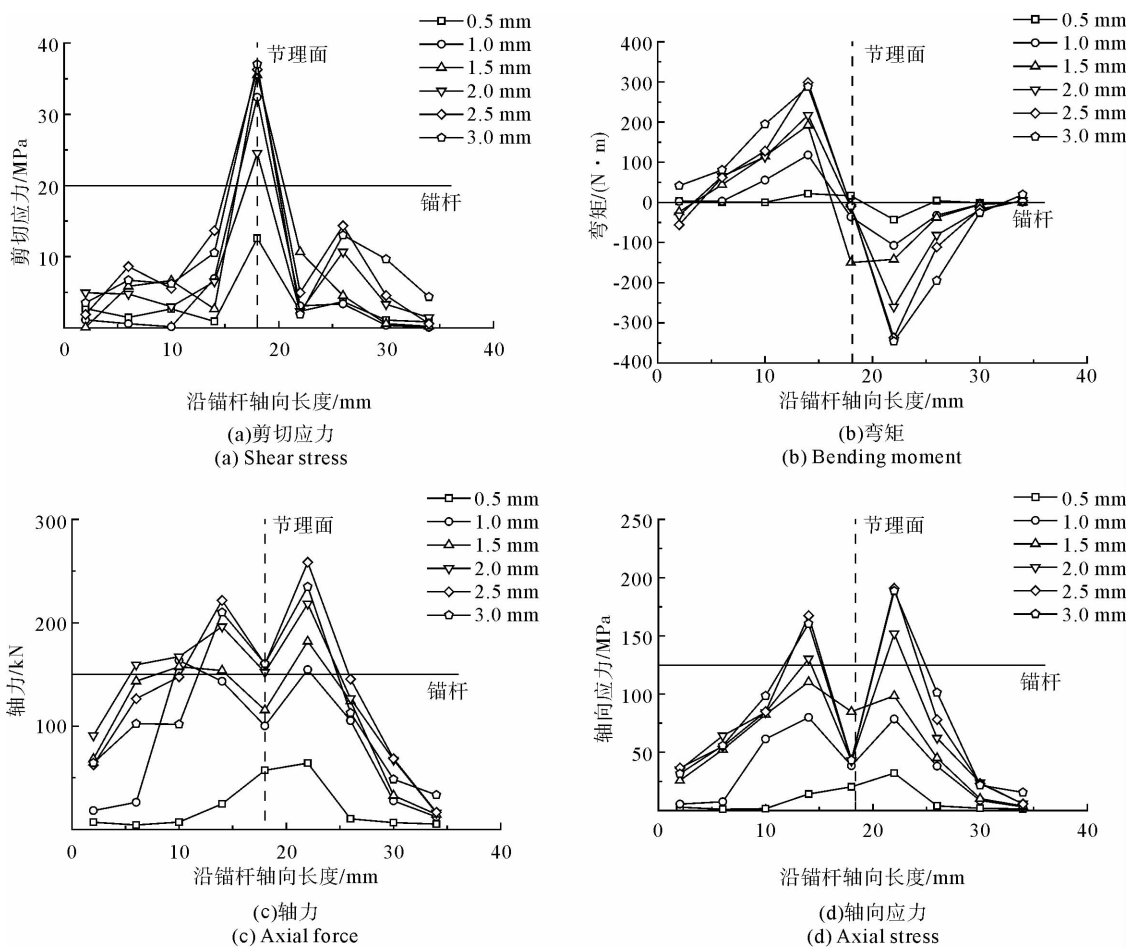


图 10 16%延伸率锚杆受力状态图

Fig. 10 Stress state along the whole length of bolt with elongation 16%

根据 Mises 准则,锚杆所能承受的最大剪应力为 $\tau_m = \sigma_y / \sqrt{3}$,按这个关系设置锚杆颗粒之间的较低的平行黏结的法向强度和切向强度,当剪切过程中锚杆颗粒之间的黏结强度超过其破坏的极限强度时,锚杆的破坏形式和破坏状态如图 12 所示。在节理面两侧 1 倍锚杆直径的位置,也就是塑性铰处,产生张拉裂纹,导致锚杆的拉弯屈服。

4 结论

基于离散元方法利用颗粒流程序对加锚岩石节理面进行了剪切试验数值模拟研究,探讨了锚杆加固节理面的细观锚固机理,分析了不同剪切位移下锚固岩体中锚杆的受力状态和变形特征以及锚杆对节理面的锚固效应,得到如下结论:

1) 岩石节理面经锚杆加固后,其抗剪性能可以得到很大程度的提高,主要是由于锚杆加固节理面后,节理面的内聚力有了大幅度的增加,而内摩擦角的提高幅度有限。节理面锚固有效提高了节理岩体的完整性和稳定性。

2) 锚固体系中裂纹主要分布在节理面和锚杆与周围介质挤压严重的区域,锚杆的延伸率对裂纹的分布和数量有很大的影响。锚杆的延伸率越小,也就是锚杆刚度越大的时候,锚固体系中裂纹数目越多,增加的裂纹主要集中在锚杆周围介质受压区域。因此,实际节理岩体锚固中应减小锚杆力学性能对岩体的损伤。

3) 加锚岩体节理面在剪切荷载作用下,节理面的相对剪切作用促使锚杆发生弯曲变形,在节理面两侧约 1 倍锚杆直径处会形成塑性铰,而塑性铰处的轴向应力值最大,锚杆容易在塑性铰发生拉弯屈服。因此,节

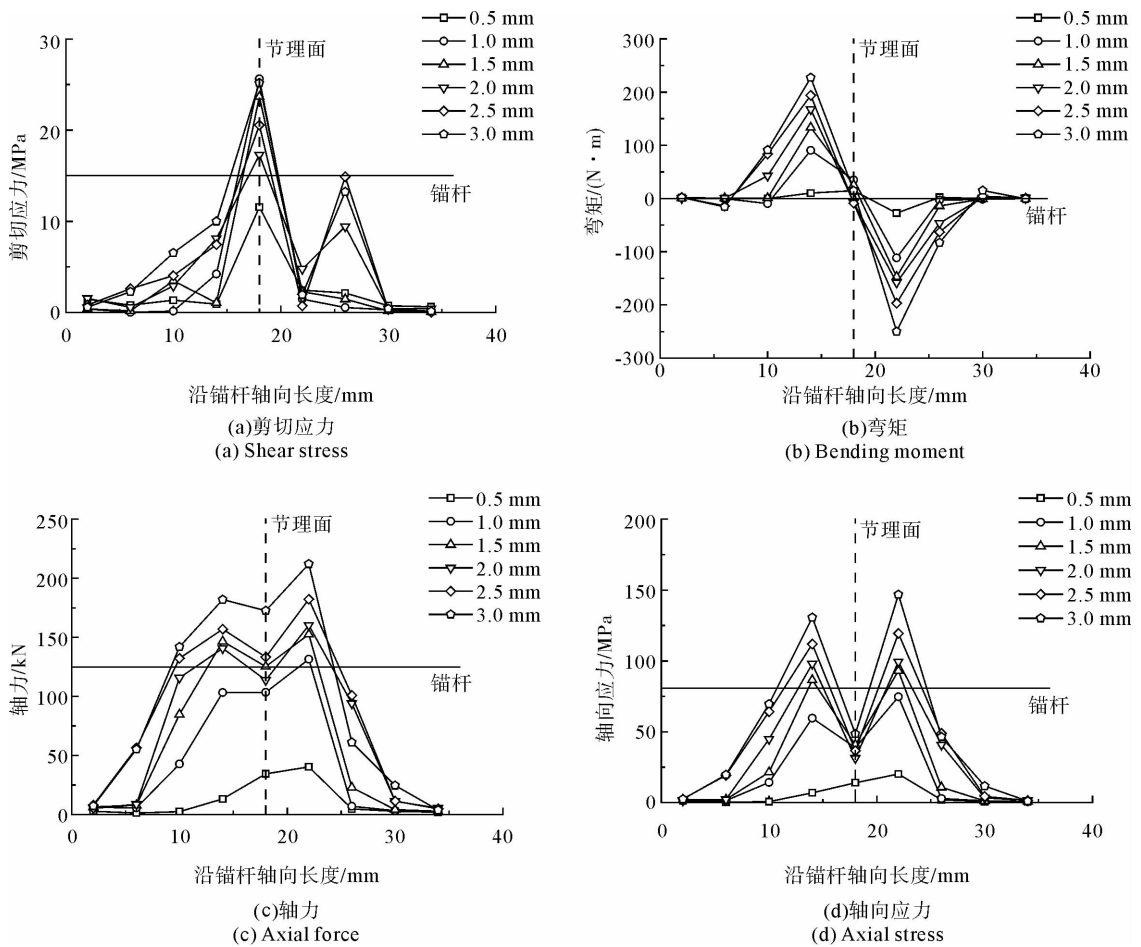


图 11 32%延伸率锚杆受力状态图

Fig. 11 Stress state along the whole length of bolt with elongation 32%

理岩体加固应根据锚杆的受力特点对其进行优化设计,尽量使用抗弯能力强的锚杆材料和几何形状,以增强系统的抗弯抗剪能力,防止锚杆受剪导致的拉弯屈服。

4)在剪切荷载作用下,锚杆靠近节理面位置处的变形大致呈“S”形,且沿轴向的应变在塑性铰处最大,节理面与锚杆交叉处次之,在锚杆两端接近于0。因此,可以对节理面附近位置处锚杆的结构进行优化设计,使其符合大变形的特征,防止过早屈服。

参考文献:

[1]Patton F D. Multiple modes of shear failure in rock[C]//1st Congress on International Society for Rock Mechanics, Lisbon, Sep. 25-Oct. 1, 1966:509-513.
 [2]Goodman R E. Methods of geological engineering in discontinuous rocks[M]. New York: West Publishing Company, 1976: 472-490.
 [3]Barton N, Choubey V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1977, 10(1/2): 1-54.
 [4]Jiang Y J, Li B, Tanabashi Y. Estimating the relation between surface roughness and mechanical properties of rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(6): 837-846.
 [5]蒋宇静,王刚,李博,等. 岩石节理剪切渗流耦合试验及分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2254-2259.
 Jiang Yujing, Wang Gang, Li Bo, et al. Experimental study and analysis of shear-flow coupling behaviors of rock joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2254-2259.

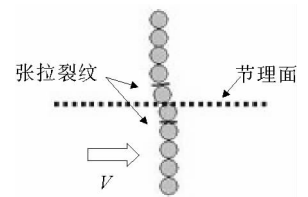


图 12 锚杆失效示意图

Fig. 12 Illustration of bolt failure

- [6]杜时贵,胡晓飞,罗战友,等.节理抗剪强度综合评价的试验研究[J].工程地质学报,2008,16(1):89-97.
Du Shigui, Hu Xiaofei, Luo Zhanyou, et al. A comprehensive experimental evaluation of rock joint shear strength[J]. Chinese Journal of Engineering Geology, 2008, 16(1): 89-97.
- [7]曹平,范祥,蒲成志,等.节理剪切试验及其表面形貌特征变化分析[J].岩石力学与工程学报,2011,30(3):480-485.
Cao Ping, Fan Xiang, Pu Chengzhi, et al. Shear test of joint and analysis of morphology characteristic evolution of joint surface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(3): 480-485.
- [8]夏才初,宋英龙,唐志成,等.粗糙节理剪切性质的颗粒流数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2012,31(8):1545-1552.
Xia Caichu, Song Yinglong, Tang Zhicheng, et al. Particle flow numerical simulation for shear behavior of rough joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1545-1552.
- [9]余华中,阮怀宁,褚卫江.岩石节理剪切力学行为的细观模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(7):1482-1490.
Yu Huazhong, Ruan Huaining, Chu Weijiang. Particle flow code modeling of shear behavior of rock joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7): 1482-1490.
- [10]Sten B. Shear strength of hard rock joints reinforced by grouted untensioned bolts[C]//3rd International ISRM Congress, Denver, Colorado, 1974:1194-1199.
- [11]Spang K, Egger P. Action of fully-grouted bolts in jointed rock and factors of influence[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1990, 23: 201-229.
- [12]Egger P, Zabuski L. Behaviour of rough bolted joints in direct shear tests[C]//7th ISRM International Congress on Rock Mechanics, Aachen, Germany, Sep. 16-20, 1991:1285-1288.
- [13]Ferrero A M. The shear strength of reinforced rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1995, 32(6): 590-600.
- [14]Pellet F, Egger P. Analytical model for the mechanical behavior of bolted rock joints subjected to shearing[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1996, 29(2): 73-97.
- [15]Aziz N, Hossein J, Hadi M S. The effect of resin thickness on bolt-grout-concrete interaction in shear[C]//6th Australasian Coal Operators Conference, Brisbane, April 26-28, 2005:3-9.
- [16]Jalalifar H, Aziz N. Experimental and 3D numerical simulation of reinforced shear joints[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43: 95-103.
- [17]葛修润,刘建武.加锚节理面抗剪性能研究[J].岩土工程学报,1988,10(1):8-19.
Ge Xiurun, Liu Jianwu. Study of the shear resistance behaviour of bolted rock joints[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 10(1): 8-19.
- [18]刘波.锚杆横向效应及综合抗力研究[D].北京:中国矿业大学,1998:1-55.
- [19]杨松林,徐卫亚,朱焕春.锚杆在节理中的加固作用[J].岩土力学,2002,23(5):604-607.
Yang Songlin, Xu Weiya, Zhu Huanchun. Reinforcement of bolt in joints[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(5): 604-607.
- [20]温进涛,朱维申,李术才.锚索对结构面的锚固抗剪效应研究[J].岩土工程学报,2003,22(10):1699-1703.
Wen Jingtiao, Zhu Weishen, Li Shucai. Research on anchoring and shearing effect of anchoring cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1699-1703.
- [21]程东幸,潘炜,刘大安,等.锚固节理岩体等效力学参数三维离散元模拟[J].岩土力学,2006,27(12):2127-2132.
Cheng Dongxing, Pan Wei, Liu Daan, et al. 3D EC modeling of equivalent mechanical parameters in anchored jointed rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2127-2132.
- [22]Song H W, Duan Y J, Yang J. Numerical simulation on bolted rock joints shearing performance[J]. Mining Science and Technology, 2010(20): 460-465.
- [23]刘爱卿,鞠文君.预应力全长锚固锚杆抗剪作用分析[J].煤矿开采,2012,17(1):45-48.
Liu Aiqing, Ju Wenjun. Analysis of shear resisting action of full-length anchored bolt with pre-stress[J]. Coal Mining Technology, 2012, 17(1): 45-48.
- [24]Itasca Consulting Group Inc. PFC 2D (particle flow code in 2D) theory and background[R]. Minnesota, USA: Itasca Consulting Group Inc, 2008.
- [25]Zhang X P, Louis N, Yuen W. Cracking processes in rock-like material containing a single flaw under uniaxial compression: A numerical study based on parallel bonded-particle model approach[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(5): 711-737.