不同预紧力作用下管索组合结构剪切力学特性研究*

王国梁[1],刘刚[1],宋威[2],肖圣超[2],单仁亮[2]

(1.山西焦煤汾西矿业昊锦塬煤业, 山西 临汾市 141000;
2.中国矿业大学(北京) 力学与土木工程学院, 北京 100083)

摘要:利用节理面间无摩擦的双剪试验装置,对锚索和新型管索组合结构(ACC)进行了剪切试验研究,分析了预紧力对两种结构抗剪性能的影响。试验结果表明,预紧力对锚索的负面作用效果要大于ACC,随着预紧力由100 kN提升至300 kN,锚索的抗剪承载能力最大降低14.82%,而ACC仅降低6.53%。利用有限元模拟深化研究ACC剪切变形特性,结果表明:预紧力越高,ACC峰值剪切荷载与破断位移越低,结构具有更高的抗弯刚度,试块强度被更早调动且试块局部更快失效;低预紧力条件下ACC破断位移大,其原因为相同剪切位移下,预紧力较低会使得结构剪切面位置拉伸变形更小,同时也会导致剪切面位置结构弯曲角度更大。

关键词:管索组合结构;预紧力;剪切力学特性;双剪试验;数值模拟

中图分类号:TD353 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)11-0166-09

Research on the Shear Mechanical Properties of Anchor Cable with C-Shaped Tube Under Different Preloads

WANG Guoliang[1], *LIU Gang*[1], *SONG Wei*[2], *XIAO Shengchao*[2], *SHAN Renliang*[2]

(1.Shanxi Coking Coal Fenxi Mining Haojinyuan Coal Industry, Linfen, Shanxi 141000, China;
2.School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: A double shear test device without friction between joint surfaces was used to conduct shear tests on anchor cables and the new type of anchor cable with C-shaped tube(ACC), and the effect of preload on the shear properties of the two structures was analyzed. The test results show that the negative effect of preload on the anchor cable is greater than that of the ACC. As the preload is increased from 100 kN to 300 kN, the shear load capacity of the anchor cable is reduced by a maximum of 14.82%, while the ACC is reduced by only 6.53%. Meanwhile, finite element simulation was utilized to further study the shear deformation properties of the ACC. The results show that the higher the preload, the lower the peak shear load and breaking displacement of the ACC, the higher the flexural stiffness of the structure, the earlier the strength of the specimen is mobilized and the faster the specimen fails locally. Under low preload conditions, the breaking displacement of the ACC is greater, which is due to the fact that for the same shear displacement, a lower preload will result in less tensile deformation at the shear plane location of the structure, and will also result in a larger bending angle of the structure at the shear plane location.

Key words: Anchor cable with C-shaped tube, Preload, Shear mechanical property, Double shear test, Numerical simulation

0 引言

锚索结构是煤矿地下巷道工程支护设计中常用的支护构件[1-3]。随着煤炭开采逐渐向深部发展,锚索结构所面临的应力环境也更为复杂,常受到拉伸与剪切的复合作用[4-6]。在深部应力这种复杂环境中,锚索更容易发生破坏,进而可能导致灾难性的后果。为了更好地了解锚索在轴力与剪力共同作用下的变形破坏机理,学者们对其进行了大量的试验研究。AZIZ等[7]通过单剪试验研究了锚索类型、预紧力、表面轮廓类型、剪切荷载施加速率以及锚索脱粘对全长锚固锚索抗剪力学性能的影响。杨仁树等[8]通过双剪试验,研究了围岩强度、预紧力、锚固方式对锚索抗剪能力的影响,并指出试块强度、预紧

* **收稿日期**:2024-12-19
基金项目:国家自然科学基金项目(52274148)
作者简介:王国梁(1970—),男,山西介休人,高级工程师,主要从事煤炭开采工作。E-mail:15650702592@163.com
通信作者:宋威(1994—),男,河北唐山人,博士研究生,主要研究方向为地下煤炭开采。E-mail:is.songwei@foxmail.com

力大小对锚索剪切初期刚度影响较大。陈文强等[9]基于最小势能变分原理，建立了加锚节理面的抗剪强度计算公式。WANG 等[10]通过大型试验台进行了全长锚固锚索单剪试验，并通过数值模拟分析得到了单根钢绞线拉剪破坏机理。研究成果为提升锚索结构的抗剪性能提供了参考与借鉴。

依托以往研究成果，以锚索结构为核心部件，开发了一种新型管索组合结构[11-13]，该结构是一种能够承担较高横向剪切作用的新型支护结构，能够有效应对深部地下工程中复杂的应力环境，相比于锚索结构表现出更好的支护性能。

本文以新型管索组合结构为研究对象，重点研究其在不同预紧力条件下，与锚索相比抗剪承载能力的差异，并利用有限元数值模拟的方法，模拟分析了管索组合结构的剪切变形特性。

1　双节理面剪切试验

1.1　管索组合结构简介

在巷道工程中，锚固在岩体中的锚索分为锚固段和自由段。管索组合结构（简称 ACC）是一种自由段能够承担高横向剪切力的锚索[13]，由锚索、锚固剂、锁具、托盘等常规锚索零件和 C 形管组成，如图 1 所示。锚索从 C 形管中穿过，锚固在围岩中。C 形管的结构类似管缝式锚杆，沿纵向开全缝，包裹锚索自由段。

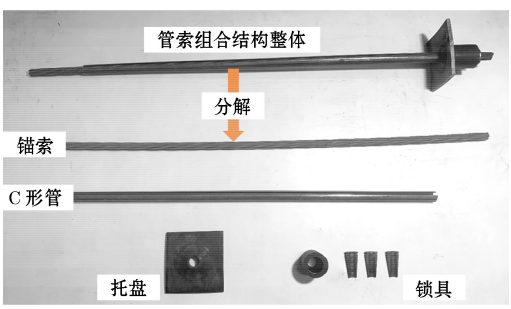


图 1　管索组合结构

Fig.1　Anchor cable with C-shaped tube

C 形管长度略小于锚索自由端，确保锚索预应力可以充分扩散到围岩中。在巷道围岩变形后，管索组合结构受到横向剪切力，C 形管逐渐压缩和变形，直到完全包裹锚索自由端，和锚索一起抵抗围岩中的剪切力，如图 2 所示。ACC 中锚索部分可以施加较高的预紧力，锚索的预紧力可以等效增加锚索拉应力，增大反作用于岩体的作用力，进而提高岩体的节理面抗剪强度。

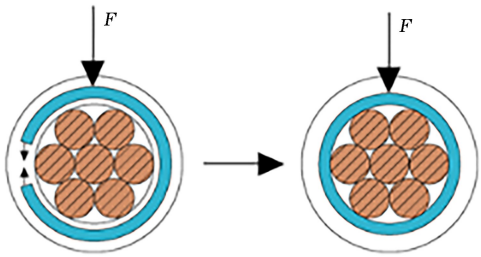


图 2　管索组合结构受剪切变形图

Fig.2　Shear deformation diagram of ACC

1.2　双剪试验材料和试验过程

本次试验研究锚索及 ACC 自由段抗剪性能，所有支护构件和孔壁之间未填充。试验时，采用 3 个相同尺寸的混凝土试块对支护构件进行双剪试验，试块中间有约 4 mm 的间隙，节理面间无摩擦。试块尺寸为 300 mm×300 mm×300 mm，试块强度为 40 MPa，主要组成成分为水、水泥、细沙、石子，按 1∶2∶4∶4 混合搅拌而成，并在养护 28 d 后进行试验。首先，将混凝土试块装入剪切盒中，剪切盒包裹试块两侧及上下面。支护构件的预紧力由距离混凝土试块外侧一定距离的水平加载端上施加，不作用在两侧混凝土试块外表面上。试验时，将两侧混凝土试块放在金属台上，并在上侧安装钢梁以限制混凝土试块垂直方向上的位移，加载柱在中间试块顶面向下压，如图 3 所示。试验台最大剪切位移为 200 mm，试验中所有支护构件均被剪断。

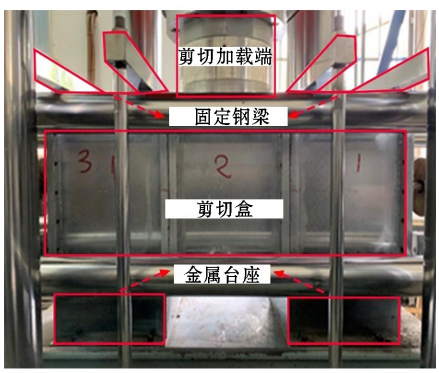


图 3　双剪切试验装置

Fig.3　Device of double shear test

1.3　双剪试验结果

本次试验共采用 3 根锚索和 3 根管索组合结构，试验过程中的预紧力分别为 100 kN、200 kN、300 kN，表 1 统计了锚索与 ACC 在不同预紧力作用下的剪切试验结果。

表 1 双剪试验结果

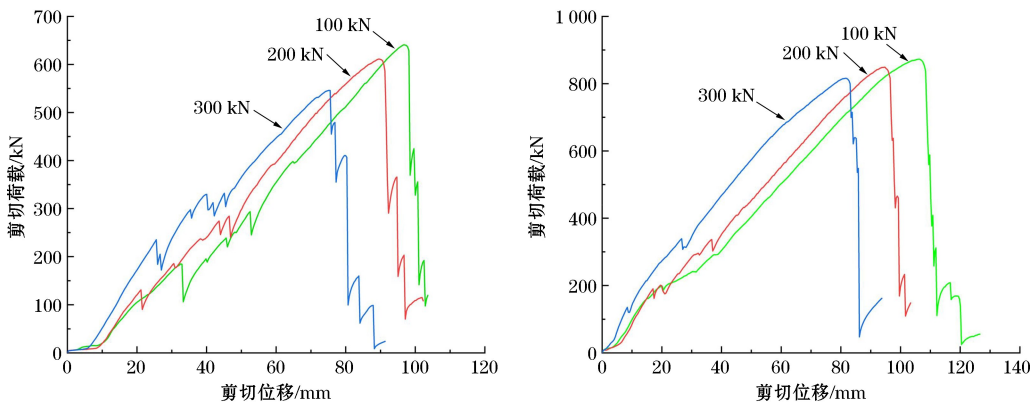
Table 1 Results of double shear tests

结构类型	锚索直径/mm	C形管内外径/mm	预紧力/kN	剪切位移/mm	峰值剪切荷载/kN	峰值轴向荷载/kN
锚索	21.6	—	100	98	641	412
			200	89	611	424
			300	75	546	437
ACC	21.6	24×28	100	106	873	450
			200	94	850	454
			300	82	816	454

图 4 为锚索和 ACC 在不同预紧力作用下的剪切荷载变化过程。由图 4(a)可知,在剪切变形初期,锚索几乎不具备抗剪切能力,曲线出现滑移段。随着预紧力的提高,曲线的斜率也逐渐增大,但是会降低锚索的峰值抗剪强度。在较高预紧力条件下,锚索结构在更小剪切位移条件下的抗剪承载能力达到峰值,进而发生破坏。在破坏过程中,锚索的剪切荷载-位移曲线呈现出阶梯状下降的特征。此现象源于锚索由多股钢绞线组成,在破坏阶段,当一根或多根钢绞线发生断裂时,剩余钢绞线上的应力会重新分布,直至所有钢绞线全部断裂。

而 ACC 则由于 C 形管的存在,在剪切变形初期即可发挥吸能效果,产生一定的抗剪承载能力,由图 4(b)可知,随着预紧力的进一步增加,曲线同样表现出斜率增大的情况,预紧力的升高同样会降低 ACC 的峰值抗剪承载能力和破断位移。

横向对比锚索和 ACC 的剪切荷载-剪切位移曲线,可以得出以下结论:与锚索相比,ACC 的节理面初始滑移阶段几乎消失,且具备一定的抗剪承载能力;在剪切过程中,ACC 的抗剪性能显著高于传统锚索,由于 C 形管具备一定的吸能效果且能够减弱应力集中,ACC 在破坏时的剪切位移大于锚索结构;提高预紧力会降低锚索和 ACC 的抗剪承载能力,锚索降幅约为 14.82%,而 ACC 的降幅仅为 6.53%,降低幅度显著减弱。因此,在工程应用中,应用 ACC 可以降低预紧力对锚索抗剪强度的削减作用。



(a) 锚索 (b) ACC

图 4 剪切荷载-剪切位移变化曲线

Fig.4 Variation curves of shear load-shear displacement

2 ACC 数值模拟分析

2.1 数值模型建立

为进一步研究管索组合结构的抗剪机理,并且与试验结果进行对比,采用 ABAQUS 软件,参照双剪试验建立有限元模型。几何参数均按照双剪试验实际选取,参数取值见表 2,并设置各组成部件间的接触,接触关系见表 3。双剪试验中,锚索两端部采用锚具固定在机架上,在锚索两端部设置非线性弹簧模拟锚具对锚索的锚固,数值模拟模型如图 5 所示[13]。模型全部采用 C3D8R 单元类型,单元数量共计 153 691,并行求解计算,其他详细参数参照文献[13]。

表 2 模型几何尺寸

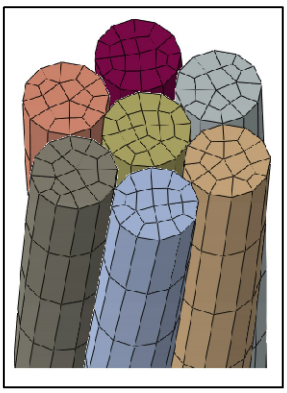
Table 2 Model geometry

混凝土试块			锚索			C形管		
边长/mm	开孔直径/mm	强度/MPa	直径/mm	长度/mm	结构	内径/mm	外径/mm	开缝宽度/mm
300	32	40	21.6	1 200	1×7 股钢绞线	24	28	8

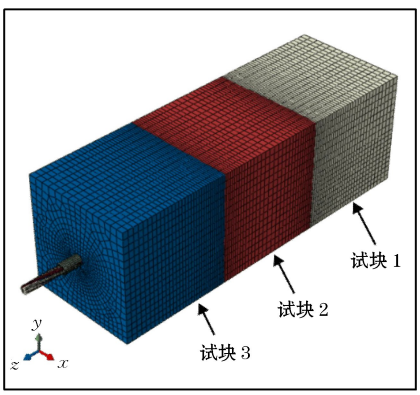
表 3　接触关系及参数设置

Table 3　Contact relationship and parameters

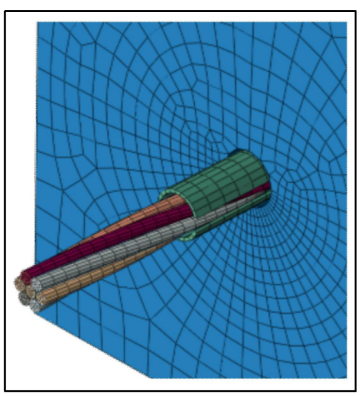
接触部分	法向	切向摩擦因数
钢丝－钢丝	硬接触	0.35
锚索－C 形管	硬接触	0.28
C 形管－混凝土试块	硬接触	0.20
混凝土试块－混凝土试块	硬接触	无摩擦



（a）锚索局部



（b）整体模型



（c）ACC 局部

图 5　双剪试验数值模型

Fig.5　Numerical model for double shear tests

2.2　数值试验方案

为研究锚索预紧力对 ACC 抗剪性能的影响机理，考虑已有双剪试验结果与研究目的，数值模拟中设置锚索预紧力分别为 0、100 kN、200 kN、300 kN，锚索选用 1×7 股结构直径为 21.6 mm 的钢绞线，混凝土试块强度依据试验情况设置为 40 MPa。

混凝土的弹性模量按照公式(1)[14]进行计算，抗拉强度按照公式(2)[15]进行计算，泊松比统一取 0.2。

$$E_c=\frac{10^5}{2.2+34.74/f_{cu}} \tag{1}$$

式中：E_c 为混凝土的弹性模量，MPa；f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度，MPa。

$$f_t=0.26f_{cu}^{2/3} \tag{2}$$

式中，f_t 为混凝土立方体抗拉强度，MPa。

2.3　ACC 数值模型校验

为了进一步验证 ACC 双剪试验数值模型的准确性及合理性，以 100 kN 预紧力作用下的实验室 ACC 剪切试验为对照组进行校验。数值模拟中，在试块 2 顶部设置监测点，监测顶面的力与位移，在下文中该监测竖向力被称为系统剪切荷载（简称为剪切荷载）。预紧力 100 kN 时数值模拟得到的剪切荷载－位移曲线与试验得到的曲线对比如图 6 所示。整体剪切过程分为以下 3 个阶段：C 形管与试块孔壁间存在一定间隙，剪切初期试块与 ACC 并未接触，此阶段为无接触阶段，轴力保持为预紧力，剪切荷载近似为 0；随着剪切荷载的增加，试块与 ACC 产生接触，剪切荷载由 ACC 整体承担，剪切荷载随着剪切位移的增加而增加；剪切荷载达到峰值后突降，此时锚索已经发生破断。由图 6 可知，数值模拟结果与试验结果较为吻合，该数值模型能够反映出 ACC 整体的受力与变形过程。

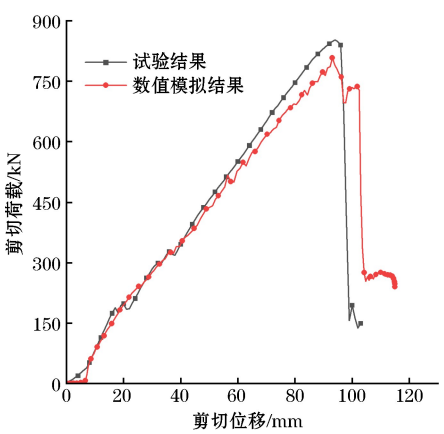
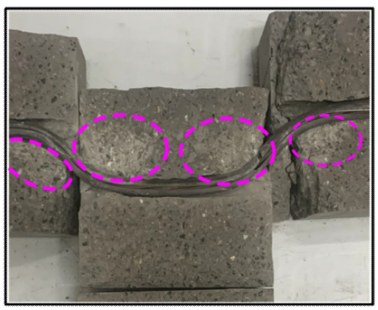


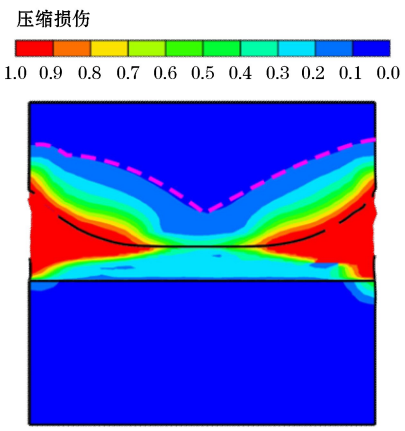
图 6　预紧力 100 kN 时剪切荷载－剪切位移曲线对比

Fig.6　Comparison of shear load-shear displacement curves when preload is 100 kN

在数值模型中,混凝土试块采用 ABAQUS 中的塑性损伤准则来表征其破坏状态。模拟过程中,随着剪切荷载的持续增加,试块损伤与破坏区域范围逐步扩大,该力学过程能够较好地被 CDP 本构中的压缩损伤表征。试验后试块形态与数值模拟得到的试块压缩损伤分布如图 7 所示。由图 7 可知,试块局部区域在高压应力作用下发生微观破碎,与数值模拟得到的较高的压缩损伤区域基本一致。



(a) 试块试验后破坏形态



(b) 数值模拟压缩损伤区域(中部试块)

图 7 双剪试验后试块形态及损伤分布

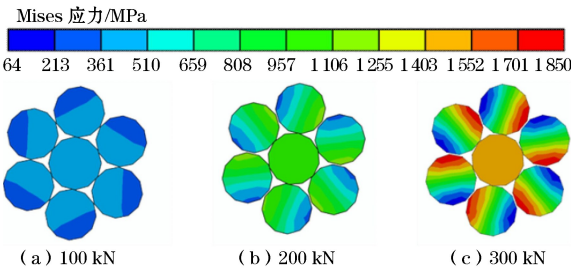
Fig.7 Specimen morphology and damage distribution after double shear test

图 6 和图 7 结果表明,使用 ABAQUS 所建立的非线性有限元模型能够较好地模拟 ACC 在剪切荷载下的力学响应,可以进行不同锚索预紧力下 ACC 受剪力学特性的研究。

3 预紧力对 ACC 剪切特性的影响

3.1 预紧力对 ACC Mises 应力的影响

对锚索施加预紧力,不同预紧力下锚索中心截面拉伸阶段 Mises 应力分布如图 8 所示,拉伸结束后锚索最大 Mises 应力与预紧力的关系如图 9 所示。随着预紧力的提高,最大 Mises 应力呈线性增加。因锚索的螺旋线几何构造,在拉伸荷载作用下各个金属丝存在拉伸和弯曲的耦合变形,所以应力分布并不均匀,但呈现出一定的对称性特征。



(a) 100 kN (b) 200 kN (c) 300 kN

图 8 不同预紧力下 Mises 应力分布

Fig.8 Mises stress distribution under different preloads

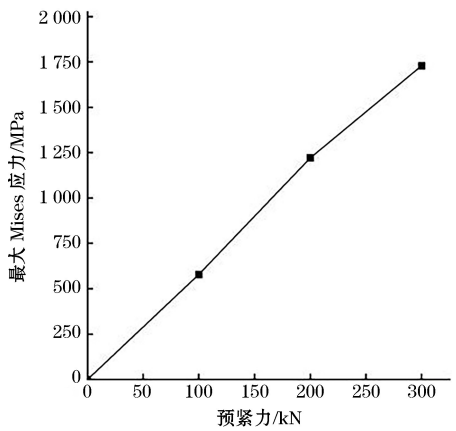


图 9 不同预紧力下拉伸阶段锚索最大 Mises 应力

Fig.9 Maximum Mises stress of anchor cable in tension stage with different preloads

剪切荷载下 ACC 在剪切面两侧产生弯曲变形,刘才华等[16]指出支护构件在剪切面的轴力与剪力对抵抗剪切荷载均有贡献。取双剪系统中间部分做受力分析,如图 10 所示,经推导可得双剪系统的剪切力的计算公式,见式(3)。因双剪试验存在两个剪切面,所以合力为 2 倍。

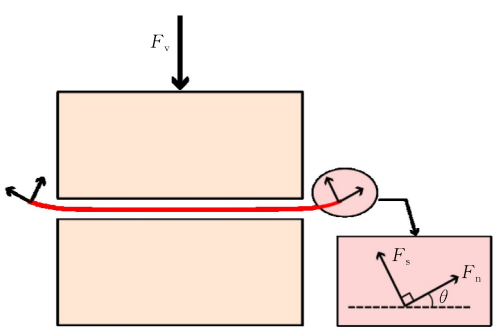


图 10 剪切力与 ACC 截面内力关系

Fig.10 Relationship between the shear force and internal force in ACC section

$$F_v=2(F_n\sin\theta+F_s\cos\theta) \quad (3)$$

式中:F_v 为系统剪切荷载,kN;F_n 为剪切面位置结构轴力,kN;F_s 为剪切面位置结构剪力,kN;θ 为结构弯曲角度,(°)。

利用 ABAQUS 自由体切面功能,对 ACC 剪切面位置截面轴力剪力与弯曲角度进行提取,式(3)计算结果与数值模拟计算得到的剪切荷载位移曲线对比如图 11 所示,两曲线基本一致,因此,式(3)能够反映出剪切过程的受力特点。

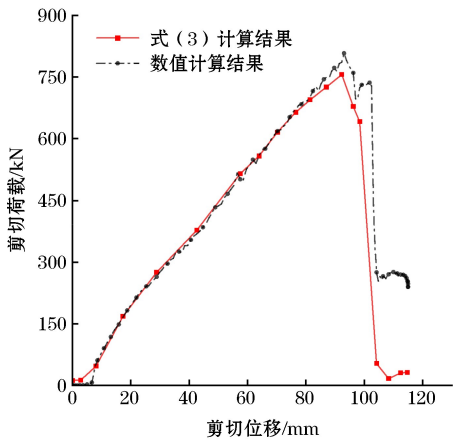


图 11 式(3)计算结果与数值计算结果对比

Fig.11 Comparison between the results calculated by equation (3) and the numerical calculation results

3.2 预紧力对 ACC 弯曲角度的影响

不同预紧力下,剪切面位置 ACC 弯曲角度与剪切位移的关系对比如图 12 所示。不同预紧力下 ACC 弯曲角度的演化具有相同规律,随剪切位移的增加,弯曲角度增加,增速逐渐放缓。在剪切位移小于 28 mm 时,不同预紧力下弯曲角度演化基本无差别,其后低预紧力下结构弯曲角度的增长更快。剪切位移小于 28 mm 时主要为塑性铰的形成阶段,锚索在剪切面两侧发生如图 13 所示的对称弯曲变形。CHEN 等[17]指出预紧力越高,钢绞线的抗弯刚度越大,由此可知,预紧力越高,ACC 的整体抗弯刚度越大。

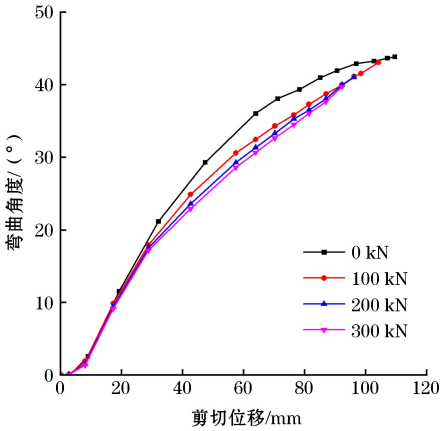


图 12 不同预紧力下 ACC 弯曲角度与剪切位移关系

Fig.12 Relationship between bending angle and shear displacement of ACC under different preloads

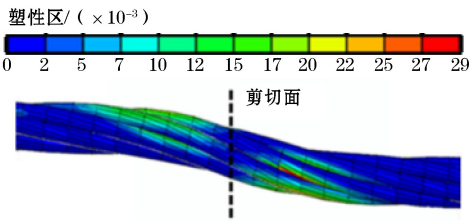


图 13 锚索对称弯曲变形

Fig.13 Symmetrical bending deformation of anchor cable

剪切位移达到 28 mm 时,不同预紧力下试块最小主应力分布如图 14 所示。由图 14 可知,预紧力为 300 kN 时,试块与 ACC 接触部位最小主应力绝对值更大,试块局部在三轴受压下具有一定的承载能力,此时 ACC 的刚度最高。由于 ACC 具有更高的刚度,试块强度更早地被调动,也更早达到失效条件,从而试块局部产生破碎,塑性铰同步向外扩展,ACC 弯曲变形进一步加大。

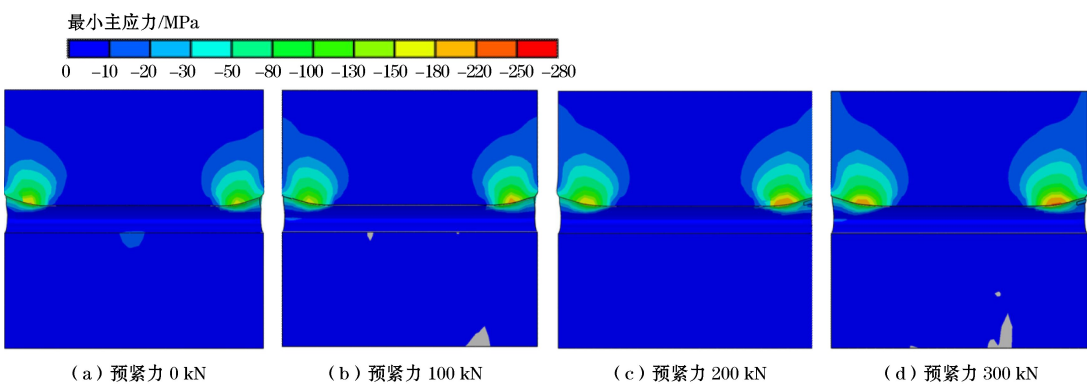


图 14 剪切位移 28 mm 时不同预紧力下试块最小主应力分布

Fig.14 Minimum principal stress distribution of specimen under different preloads when the shear displacement is 28 mm

剪切位移均为 61 mm 时不同预紧力下 ACC 的变形形态对比如图 15 所示,在相同的剪切位移下,预紧力越高,剪切面位置结构弯曲角度越小。不同预紧力下 ACC 弯曲形态示意如图 16 所示,图中 u_s 表示剪切位移,在剪切位移大于 28 mm 的塑性铰扩展阶段,预紧力越高,剪切面位置结构弯曲角度越小,塑性铰横向扩展距离越大,与图 12 弯曲角度的演化规律一致。

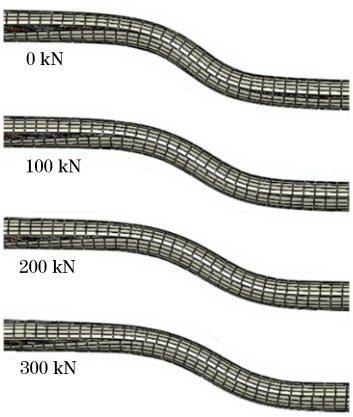


图 15 剪切位移 61 mm 时不同预紧力下 ACC 变形形态

Fig.15 Deformation patterns of ACC under different preloads when the shear displacement is 61 mm

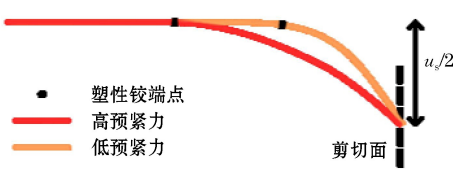


图 16 不同预紧力下 ACC 弯曲形态

Fig.16 Bending pattern of ACC under different preloads

总体来说,锚索的拉伸变形由预紧力施加造成的拉伸变形和后续剪切荷载造成的局部拉伸两部分组成。预紧力对破断位移的影响有两方面:一方面,预紧力越高,在剪切开始前,锚索整体的拉伸变形越大,从而使得相同的位移下,剪切面位置锚索的拉伸变形越大;另一方面,高预紧力下 ACC 变形形态导致剪切面位置锚索拉伸变形减小,但锚索初始拉伸变形起主导作用,因此最终高预紧力剪切破断位移减小。

数值模拟所得 ACC 最大弯曲角度随预紧力的变化如图 17 所示,不同预紧力下破断后结构弯曲形态试验结果如图 18 所示。由图 17 和图 18 可知,预紧力越大,ACC 最大弯曲角度越小,低预紧力 ACC 在剪切中后期弯曲角度增长较快且破断位移更大。同时,两者共同作用导致低预紧力下结构剪切面位置破断时的弯曲角度更大,试验结果与数值模拟结果均证明了这一现象。

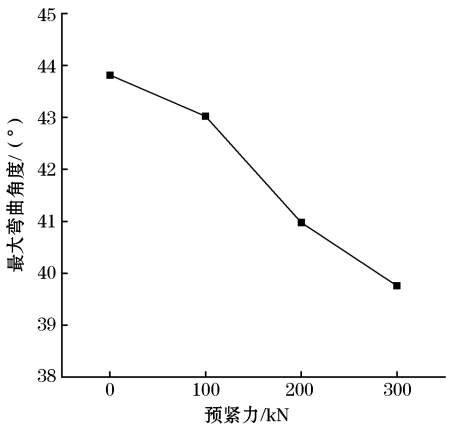


图 17 ACC 最大弯曲角度随预紧力变化模拟结果

Fig.17 Simulation results of maximum bending angle of ACC varying with preloads



(a) 100 kN, 45.8° (b) 200 kN, 41.5° (c) 300 kN, 38.7°

图 18 不同预紧力下 ACC 最大弯曲角度试验结果

Fig.18 Test results of maximum bending angle of ACC under different preloads

3.3 预紧力对 ACC 剪力的影响

不同预紧力下剪切面位置 ACC 剪力的演化如图 19 所示。剪切位移小于 28 mm 时,不同预紧力下剪力均快速上升,最大剪力均接近 60 kN,差别较小。但预紧力为 0 时,剪力峰值稍有降低,剪力峰值对应位移最大;其后随着剪切位移的增加,剪力逐渐降低后保持在一定范围内波动。剪力的演化规律同样表明剪切位移小于 28 mm 时主要为塑性铰形成

阶段,此时 ACC 抗弯刚度较大,因此剪力快速增加,当形成塑性铰后,ACC 抗弯刚度快速下降,且与试块的接触面积增加,试块与 ACC 的接触力是其后续弯曲变形的驱动力。进一步单独考查锚索与 C 形管,200 kN 预紧力下,剪切面位置锚索与 C 形管剪力演化如图 20 所示。锚索与 C 形管剪力演化规律与 ACC 一致,且在剪力达到峰值时,C 形管剪力占 ACC 剪力的 30%左右,C 形管承担了部分剪切荷载,能够使锚索的强度更好地发挥。

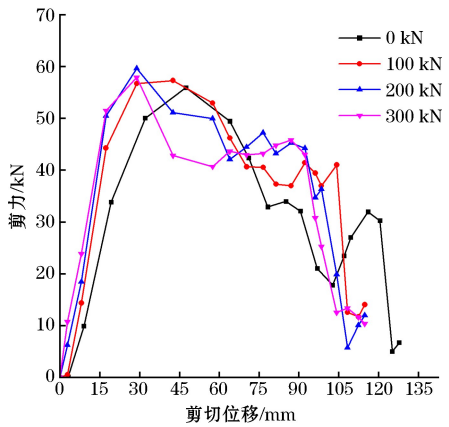


图 19 不同预紧力下 ACC 剪切面位置剪力演化

Fig.19 Evolution of shear force at ACC shear plane location under different preloads

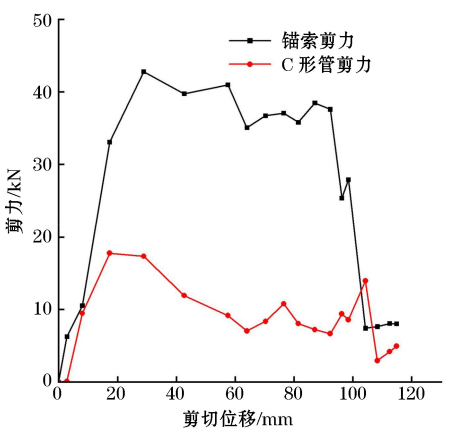


图 20 200 kN 预紧力下剪切面位置锚索与 C 形管剪力演化

Fig.20 Shear force evolution of anchor cable and C-shaped tube at shear plane location under 200 kN preload force

不同预紧力下 ACC 剪切荷载-位移曲线对比如图 21 所示。将曲线的斜率定义为系统的剪切刚度,高预紧力下,剪切初期系统剪切刚度更高,剪切荷载上升更快,剪切位移大于 45 mm 后,不同预紧力下系统剪切刚度差异较小。不同预紧力下 ACC 轴力-剪切位移曲线如图 22 所示,随着剪切位移增加,不同预紧力的轴力呈现相似的变化规律,剪切初期由于空隙轴力剪切位移基本为 0,轴力增长较快,后期增速放缓。

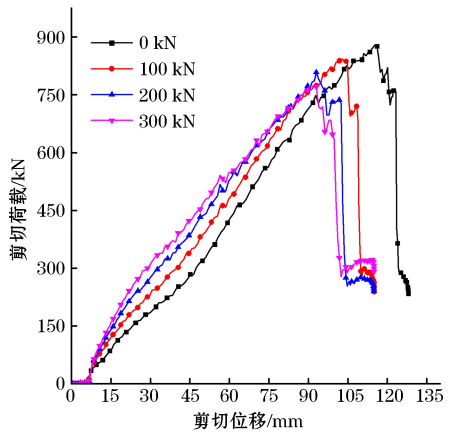


图 21 不同预紧力下 ACC 剪切荷载-位移曲线对比

Fig.21 Comparison of ACC shear load-displacement curves under different preloads

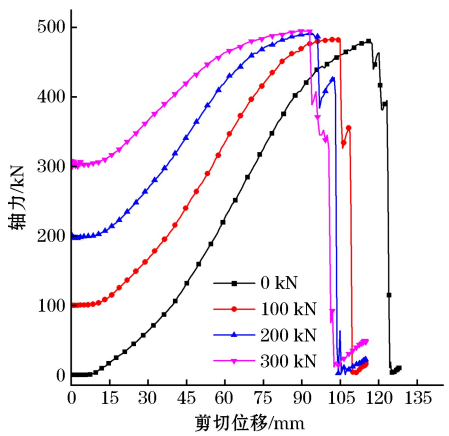


图 22 不同预紧力下 ACC 轴力-剪切位移曲线对比

Fig.22 Comparison of ACC axial force-shear displacement curves under different preloads

4 结论

为了研究传统锚索与新型管索组合结构在不同预紧力作用下抗剪能力的差异性,以及预紧力对 ACC 抗剪作用的影响,对两种结构进行不同预紧力条件下的双剪试验。利用 ABAQUS 软件,建立实际七股钢绞线锚索与 C 形管组成的管索组合结构的精细化数值分析模型,并结合试验结果设置不同的预紧力进行数值研究,得出如下结论。

(1) 提高预紧力使 ACC 在相同变形量的条件下具备更高的抗剪承载能力,但结构的峰值抗剪强度也会随预紧力的增高明显降低,而 ACC 的峰值抗剪承载能力降幅仅为 6.52%,锚索则为14.82%,表明 ACC 由于其结构特殊性可以有效降低预紧力

对内部锚索抗剪承载能力的削弱作用。

(2) 预紧力提高,ACC 峰值剪切力与破断位移减小,但结构具有更高的抗弯刚度,试块强度被更早调动,试块局部更早发生失效,从而相同剪切位移下弯曲角度减小,高预紧力下系统初期剪切刚度更高,这主要是受到轴力分量的控制影响。

(3) 低预紧力且在相同剪切位移情况下,剪切面位置锚索拉伸变形更小,最终破断位移更大;低预紧力下 ACC 在剪切中后期弯曲角度增长较快,ACC 的破断位移更大,两者共同作用导致低预紧力下结构剪切面位置破断时的弯曲角度更大。

参考文献(References):

[1] 刘少伟,窦智,付孟雄,等.矿用锚索捻距与拉伸力学性能及锚固效果关系研究[J].煤炭学报,2024,49(增刊 1):80-91.
LIU Shaowei, DOU Zhi, FU Mengxiong, et al. Study on the relationship between lay distance and tensile mechanical properties and anchorage effect of mine anchor cable[J]. Journal of China Coal Society,2024,49(Suppl.1):80-91.

[2] 郭毛毛,苏学贵,杜献杰,等.倾斜层理岩体预应力锚索主动锚固机理试验研究[J].矿业研究与开发,2022,42(5):89-94.
GUO Maomao, SU Xuegui, DU Xianjie, et al. Expermental study on active anchorage menchanism of prestressed anchor cable in inclined bedding rock mass[J]. Mining Research and Development,2022,42(5):89-94.

[3] 张云峰,张飞腾,张永强,等.托顶煤巷道全锚索支护参数匹配性研究[J].矿业研究与开发,2021,41(2):104-108.
ZHANG Yunfeng, ZHANG Feiteng, ZHANG Yongqiang, et al. Research on parameter matching of full anchor cable support in top-coal roadway[J]. Mining Research and Development,2021,41(2):104-108.

[4] 姚振巩,王洪江.采场锚索预加固技术的研究[J].矿业研究与开发,2006(6):47-50.
YAO Zhengong, WANG Hongjiang. Study on pre-reinforcing technology of stope wall with cable bolt[J]. Mining Research and Development,2006(6):47-50.

[5] FERRERO A M. The shear strength of reinforced rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts,1995,32(6):595-605.

[6] LI X W, AZIZ N, MIRZAGHORBANALI A, et al. Behavior of fiber glass bolts, rock bolts and cable bolts in shear[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2016,49(7):2723-2735.

[7] AZIZ N, RASEKH H, MIRZAGHORBANALI A, et al. An experimental study on the shear performance of fully encapsulated cable bolts in single shear test[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2018,51(7):2207-2221.

[8] 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.

[9] 陈文强,贾志欣,赵宇飞,等.剪切过程中锚杆的轴向和横向作用分析[J].岩土力学,2015,36(1):143-148+155.
CHEN Wenqiang, JIA Zhixin, ZHAO Yufei, et al. Analysis of axial and transverse effects of rock bolt during shearing process[J]. Rock and Soil Mechanics,2015,36(1):143-148+155.

[10] WANG K Z, ZHAO Y F, HU Z G, et al. Shear test of pre-stressed anchor block and fracture mechanism analysis of anchor cable[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2022,56(1):589-601.

[11] 单仁亮,陶宇,孔祥松,等.能承担横向剪切力的锚管索支护结构:201410206614.5[P].2016-03-02.

[12] 单仁亮,仝潇,黄鹏程,等.管索组合结构及其力学性能研究[J].岩土力学,2022,43(3):602-614.
SHAN Renliang, TONG Xiao, HUANG Pengcheng, et al. Research on the anchor cable combined with the C-shaped tube and the mechanical properties[J]. Rock and Soil Mechanics,2022,43(3):602-614.

[13] 单仁亮,宋威,张书鹏,等.巷道支护管索组合结构剪切力学响应精细有限元分析[J].岩石力学与工程学报,2024,43(7):1561-1579.
SHAN Renliang, SONG Wei, ZHANG Shupeng, et al. Precise finite element analysis of shear mechanical responses of anchor cables with C-shaped tube in roadway support[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2024,43(7):1561-1579.

[14] 余志武,丁发兴.混凝土受压力学性能统一计算方法[J].建筑结构学报,2003(4):41-46.
YU Zhiwu, DING Faxing. Unified calculation method of compressive mechanical properties of concrete[J]. Journal of Building Structures,2003(4):41-46.

[15] 丁发兴,余志武.混凝土受拉力学性能统一计算方法[J].华中科技大学报(城市科学版),2004,21(3):29-34.
DING Faxing, YU Zhiwu. Unified calculation method of mechanical properties of concrete in tension[J]. Huazhong University of Science and Technology (City Science Edition),2004,21(3):29-34.

[16] 刘才华,李育宗.考虑横向抗剪效应的节理岩体全长黏结型锚杆锚固机制研究及进展[J].岩石力学与工程学报,2018,37(8):1856-1872.
LIU Caihua, LI Yuzong. Research progress in bolting mechanism and theories of fully grouted bolts in jointed rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2018,37(8):1856-1872.

[17] CHEN Z H, YU Y J, WANG X D, et al. Experimental research on bending performance of structural cable[J]. Construction and Building Materials,2015,96:279-288.